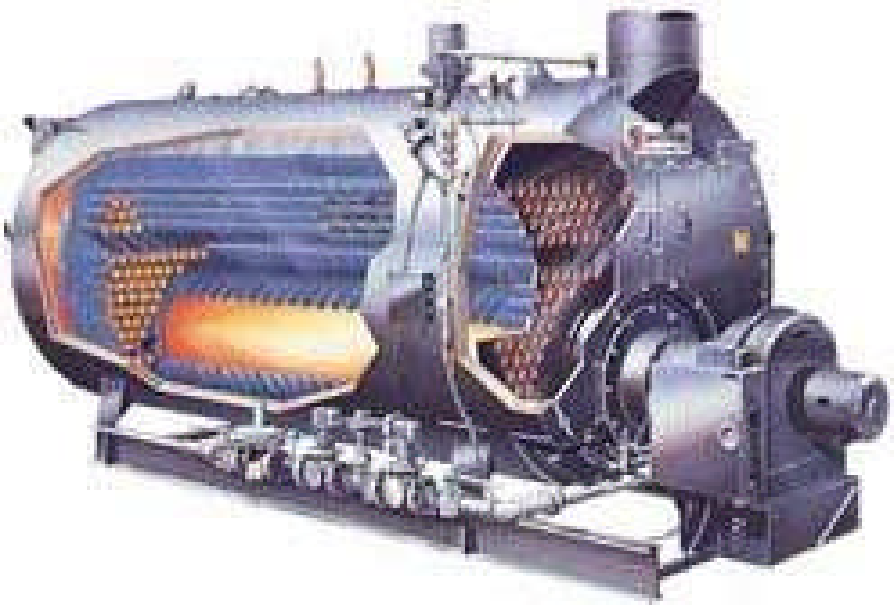
Geradores de Vapor



Luiz Carlos Martinelli Jr.
Prof. UNIJUÍ - Campus Panambi

Sumário

PARTE 1 – INTRODUÇÃO A GERADORES DE VAPOR.....6

DEFINIÇÕES INICIAIS: 6
COMPONENTES 11
Principais Componentes *11*
Outros Componentes *12*
PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO 15
DEFINIÇÕES 15
BALANÇO TÉRMICO.....17
CALDEIRAS FLAMOTUBULARES 23
Classificação *23*
Caldeira Cornovaglia *24*
Caldeira Lancashire.....*24*
Caldeiras Multitubulares *24*
Caldeiras Locomotivas & Locomóveis.....*25*
Caldeiras Escocesas.....*26*
CALDEIRAS AQUATUBULARES.....28
Caldeiras Aquatubulares.....*28*
Classificação *28*
Caldeiras de Tubos Retos.....*28*
Caldeiras de Tubos Curvos.....*29*
Caldeiras com Circulação Forçada.....*31*
BIBLIOGRAFIA - PARTE 1.....34

PARTE 2 - RECEPÇÃO, ENSAIO E OPERAÇÃO.....36

RECEPÇÃO.....36
ENSAIO DE PERFORMANCE E EFICIÊNCIA TÉRMICA 36
OPERAÇÃO DE GERADORES DE VAPOR.....38
INSPEÇÃO DA CALDEIRA A VAPOR 38
MEDIDAS DE SEGURANÇA 38
Caldeiras de Combustíveis Sólidos.....*38*
Caldeiras de Combustíveis Líquidos.....*39*
Cuidados Especiais *40*
Procedimentos a serem seguidos *41*
BIBLIOGRAFIA – PARTE 2: 42

PARTE 3 - NR-13 CALDEIRAS E VASOS DE PRESSÃO 43

13.1 CALDEIRAS A VAPOR - DISPOSIÇÕES GERAIS 43
13.2 INSTALAÇÃO DE CALDEIRAS A VAPOR 51
13.3 SEGURANÇA NA OPERAÇÃO DE CALDEIRAS.....55
13.4 SEGURANÇA NA MANUTENÇÃO DE CALDEIRAS.....59
13.5 INSPEÇÃO DE SEGURANÇA DE CALDEIRAS 62
ANEXO I-A 69
ANEXO II 71

ANEXO III 72
ANEXO IV 73
Categorias de Vasos de Pressão *75*
Prazos para Enquadramento das Empresas a NR-13 ..... *76*

PARTE 4 - CARACTERÍSTICAS E TRATAMENTO DA ÁGUA 78

INTRODUÇÃO 80
SISTEMAS GERADORES DE VAPOR 80
1. Definição e Finalidade *80*
2. Tipos *80*
3. Esquema genérico de um Gerador de Vapor *81*
I - ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO 81
1. Fontes de Captação *81*
2. Características das Águas *82*
3. Tratamento Externo *85*
II. PROBLEMAS USUAIS EM GERADORES DE VAPOR 86
1. Introdução *86*
2. Corrosão *86*
3. Depósitos *91*
4. Arraste *92*
5. Outros Problemas *93*
III - CORREÇÃO DE PROBLEMAS 95
1. Introdução *95*
2. Objetivos *96*
3. Corrosão *96*
4. Depósitos *98*
5. Descargas *99*
6. Programas Apropriados para Tratamento Químico *100*
IV - CUIDADOS PARA GERADORES DE ALTA-PRESSÃO 105
V - PRÉ-LIMPEZA E PRÉ-TRATAMENTO DE SISTEMAS 106
1. Introdução *106*
2. Métodos *107*
VI - PROTEÇÃO DE CALDEIRAS TEMPORARIAMENTE OCIOSAS 108
1. Introdução *108*
2. Desativação Temporária das Caldeiras *108*
3. Técnicas de Proteção *108*
4. Inativação a seco da Caldeira *108*
VII - CONTROLES ANALÍTICOS 109
1. Importância *109*
2. Parâmetros Usuais Analisados *109*
3. Testes Usuais *110*
Conclusão *111*

PARTE 5 - COMBUSTÃO 112

INTRODUÇÃO 112
REAÇÕES DE COMBUSTÃO E ESTEQUIOMETRIA 115
PODER CALORÍFICO 116
ESTEQUIOMETRIA DA COMBUSTÃO 119

EXCESSO DE AR 124
MODELOS DE COMBUSTÃO 128
Combustíveis líquidos 128
Combustíveis gasosos.....131
Combustíveis sólidos.....135
Bibliografia Parte 5 141

Parte 1 – Introdução a Geradores de Vapor

Fornecendo calor à água, variamos a sua entalpia (quantidade de energia por kg de massa) e seu estado físico. Quanto mais aquecermos, mais aumentaremos sua temperatura e, conseqüentemente, sua densidade diminuirá, tornando-se mais "leve". A medida que fornecermos calor ao líquido, suas moléculas vão adquirindo energia até conseguirem vencer às forças que as mantém ligadas (na forma líquida). A rapidez da formação do vapor será tal qual for a intensidade do calor fornecido.

A pureza da água e a pressão absoluta exercida sobre ela são os fatores que irão impor a temperatura na qual se produz a ebulição. Assim, quanto menor for a pressão, menor será a temperatura de ebulição da água.

$P\left(\frac{kgf}{cm^2}\right)$	$T_{ebulição}$ (ºC)
0,0344	26,12
1 (1 at)	99,09
1,033	100
42	252,3

Definições Iniciais:

Vapor Saturado

Denomina-se "Vapor Saturado" ao vapor produzido na temperatura de ebulição à sua pressão absoluta.

Têm-se:

vapor saturado úmido: quando contém partículas de água em suspensão;

vapor saturado seco: caso contrário.

Calor Sensível (h_s)

A Adição de Entalpia do Líquido (calor sensível) é a quantidade de calorias necessárias para elevar 1 kg de água de 0 ºC até a sua temperatura de ebulição.

Calor Latente (h_{lat})

A Adição de Entalpia de Vaporização (calor latente) é a quantidade de calorias necessárias para converter 1 kg de água líquida em vapor seco à mesma temperatura e pressão (o calor latente decresce com o aumento da pressão absoluta do vapor).

Entalpia Total (h_{TOT})

Chama-se Entalpia Total do Vapor de Água, saturado, à soma do calor sensível e do calor latente:

$h_{TOT} = h_s + h_{lat}$

Quando não se consegue o vapor seco, têm-se:

$h_{TOT} = h_s + x.h_{lat}$

onde x é o título (variando de 0,0 a 1,0).

Geradores de Vapor

É um aparelho térmico que produz vapor a partir do aquecimento de um fluido vaporizante. Na prática adotam-se alguns nomes, a saber:

Caldeiras de Vapor: são os geradores de vapor mais simples, queimam algum tipo de combustível como fonte geradora de calor.

Caldeiras de Recuperação: são aqueles geradores que não utilizam combustíveis como fonte geradora de calor, aproveitando o calor residual de processos industriais (gás de escape de motores, gás de alto forno, de turbinas, etc.).

Caldeiras de Água Quente: são aqueles em que o fluido não vaporiza, sendo o mesmo aproveitado em fase líquida (calefação, processos químicos).

Geradores Reatores Nucleares: são aqueles que produzem vapor utilizando como fonte de calor a energia liberada por combustíveis nucleares (urânio enriquecido).

Dentro das Caldeiras de Vapor temos as seguintes classificações [1]:

1) Quanto à posição dos gases quentes e da água:
   - Aquatubulares (Aquotubulares)
   - Flamotubulares (Fogotubulares, Pirotubulares)

2) Quanto à posição dos tubos:
   - Verticais
   - Horizontais
   - Inclinados

3) Quanto à forma dos tubos:
   - Retos
   - Curvos

4) Quanto à natureza da aplicação:
   - Fixas
   - Portáteis
   - Locomóveis (geração de força e energia)
   - Marítimas

Como se pode observar, existem várias classificações de caldeiras de vapor, a escolha de um tipo se faz principalmente em função de:

- Tipo de serviço
- Tipo de combustível disponível
- Equipamento de combustão
- Capacidade de produção
- Pressão e temperatura do vapor
- Outros fatores de caráter econômico

Mas, de forma geral, as caldeiras possuem os seguintes elementos que a caracterizam:

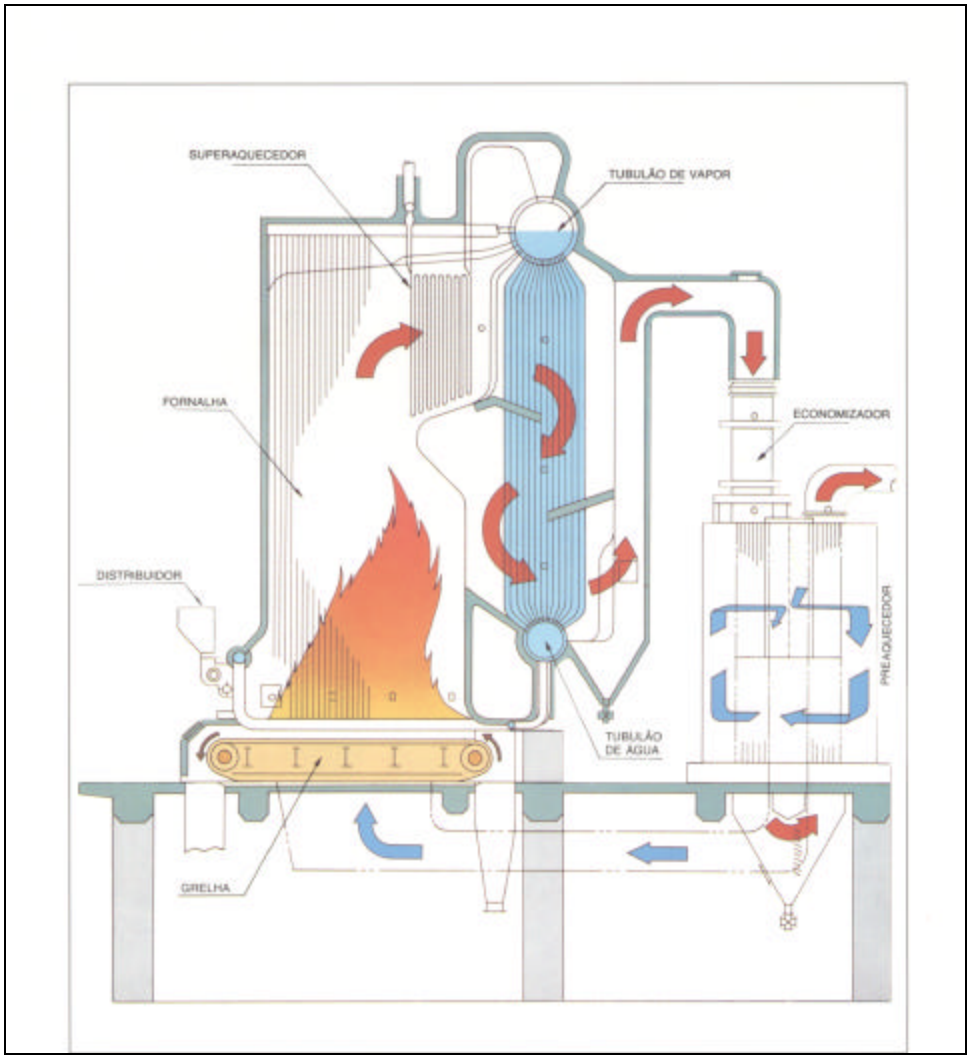


Figura 1. Caldeira Aquotubular, Fixa, Vertical

1) **Pressão de Regime:** a máxima pressão de vapor, considerada como limite superior quando do projeto.
2) **Pressão de Prova:** pressão de ensaio hidrostático a que deve ser submetido a caldeira (NR-13, item 13.10 [2])
3) **Capacidade de Evaporação:** são as partes metálicas em contato, de um lado com a água e vapor da caldeira e, do outro, com os produtos da combustão. A medição desta área se faz pelo lado exposto às chamas.
4) **Superfície de Grelhas ou Volume da Fornalha:** juntamente com o item anterior, determina a potência da caldeira. Maior será a potência quanto maior for o volume da caldeira.
5) **Outros:** peso, superfície dos superaquecedores de vapor, economizadores de água de alimentação, aquecedores de ar, volume das câmaras de água e vapor, eficiência térmica desejável, variação da demanda, espaço necessário ou disponível, amortização do investimento.

As caldeiras devem possuir, ainda, algumas condições, a saber:

1. **Projeto e Construção:** sua forma e método de construção deverá ser simples, proporcionando elevada segurança em funcionamento. Todas as partes deverão ser de fácil acesso ou desmontagem para facilitar a limpeza interna e consertos ordinários.
2. **Vaporização específica, grau de combustão e capacidade:** deverão ser projetadas de forma que, com o mínimo peso e volume do gerador, seja obtida a máxima superfície de aquecimento.
3. **Peso e espaço:** estes fatores devem se combinar para que as caldeiras se adaptem ao espaço a elas destinado.
4. **Flexibilidade de manobra e facilidade de condução:** condições fundamentais em processos de variação rápida e freqüente, onde a caldeira possua grande flexibilidade para se adaptar imediatamente às modificações da carga.
5. **Características do Vapor produzido:** as caldeiras não deverão apresentar tendência a arrastar água com o vapor, especialmente na condição de sobrecarga, evitando o fornecimento de vapor úmido ou a redução do grau de superaquecimento.
6. **Circulação de água e gases:** a circulação de água no interior da caldeira, da mesma forma que o fluxo de gases do lado externo, deverá ser ativa, de direção e sentido bem definidos para toda e qualquer condição de funcionamento.
7. **Rendimento Térmico Total:** deverá ter um rendimento elevado a fim de se obter uma economia apreciável de combustível.
8. **Segurança:** a caldeira e todos os seus elementos deverão ser projetados para obter o mais elevado fator de segurança.

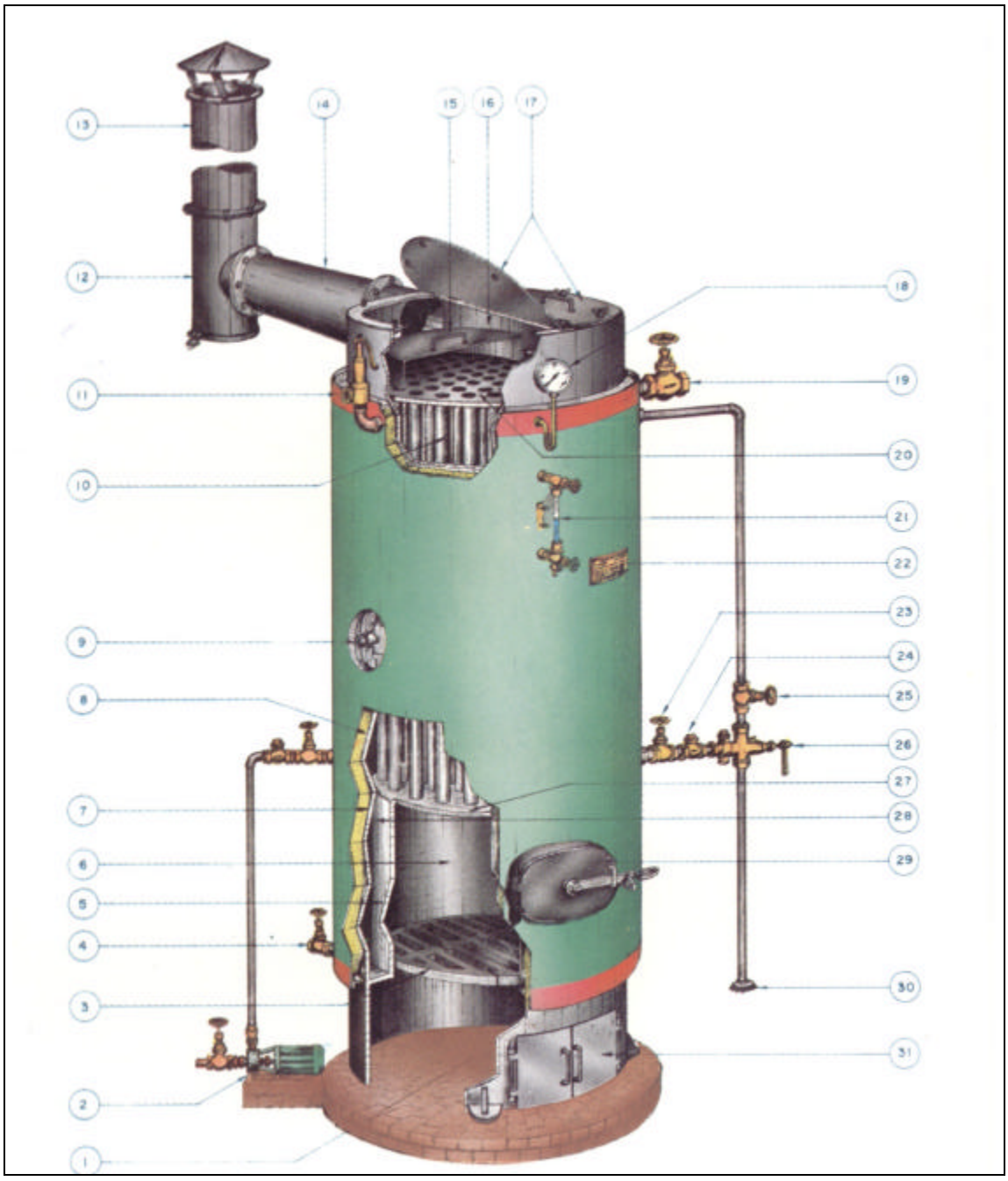


Figura 2. Caldeira Flamotubular Vertical

Descrição	
1. Cinzeiro	17. Tampas de limpeza
2. Bomba de água	18. Manômetro com sifão
3. Grelha plana	19. Válvula principal de vapor
4. Registro de purga	20. Espelho superior
5. Parede interna	21. Visor de nível
6. Fornalha imersa	22. Placa de identificação
7. Casco cilíndrico	23. Registro de alimentação de água
8. Isolamento térmico (lã de rocha)	24. Válvula de retenção
9. Tampa de inspeção	25. Registro de vapor
10. Tubos de gases	26. Injetor de água a vapor
11. Válvula de segurança com alavanca	27. Espelho inferior
12. Coletor de fuligem	28. Câmara de água
13. Chaminé	29. Tampa de carga
14. Duto de gases	30. Peneira de sucção
15. Defletor de gases	31. Porta do cinzeiro (regulador de ar)
16. Coletor de gases	

Componentes

Principais Componentes

- **Aquecedor de Ar:** aproveita o calor residual dos gases de combustão pré-aquecendo o ar utilizado na queima de combustível. Aquece o ar entre 120 e 300 ºC, dependendo do tipo de instalação e do tipo de combustível queimado.
- **Câmara de Combustão:** às vezes se confundem com a fornalha, sendo que, em outras é completamente independente. É um volume que tem a função de manter a chama numa temperatura elevada com duração suficiente para que o combustível queime totalmente antes dos produtos alcançarem os feixes (dutos) de troca de calor.
- **Caldeira de Vapor (Tambor de Vapor):** constituída por um vaso fechado à pressão contendo água que será transformada em vapor.
- **Chaminé:** tem função de retirar os gases da instalação lançando-os na atmosfera (tiragem).
- **Cinzeiro:** local de deposição das cinzas e restos de combustível que caem da fornalha.
- **Condutos de Fumo:** são canais que conduzem os gases da combustão até a chaminé.
- **Economizador:** utilizando o calor residual dos gases, aquece a água de alimentação. É normalmente instalado após os superaquecedores. Além de melhorar o rendimento da unidade, sua instalação minimiza o choque térmico entre a água de alimentação e a já existente no tambor.
- **Fornalha:** principal equipamento para a queima do combustível. Entre as suas funções estão incluídas: a mistura ar-combustível, a atomização e vaporização do combustível e a conservação de uma queima contínua da mistura.

- **Grelhas:** utilizadas para amparar o material dentro da fornalha, podendo ser fixas, rotativas e inclinadas.
- **Queimadores:**
- **Reaquecedor:** tem função equivalente a dos superaquecedores. A sua presença torna-se necessária quando se deseja elevar a temperatura do vapor proveniente de estágios intermediários de uma turbina.
- **Retentor de Fuligem:** tem como função separar a fuligem, resultante da queima não estequiométrica do combustível, dos gases antes dos mesmos saírem pela chaminé.
- **Superaquecedor:** consiste de um ou mais feixes tubulares, destinados a aumentar a temperatura do vapor gerado na caldeira.

Outros Componentes

Alarme de Falta D'água: sinal sonoro e luminoso que dispara quando o nível de água na caldeira está muito baixo.

Controlador de Nível: são equipamentos que controlam o nível de água na caldeira. Podem ser constituídos de várias formas, sendo os mais usados os de eletrodos e o sistema de bóia.

Fusível Térmico (tampão): consiste de um parafuso com um furo no centro, sendo este preenchido com uma liga de metal de baixo ponto de fusão. É instalado num ponto abaixo do qual a água não pode ficar. Se ocorrer o problema, a temperatura do material aumenta, provocando a fusão do metal de preenchimento e dando passagem para a água, que apagará o fogo da fornalha.

Indicadores de Pressão (manômetros): são instrumentos utilizados para medir a pressão de líquidos, gases e vapores.

Injetor de Água: é um dispositivo destinado à alimentação de água, como alternativa em caso de falha nas bombas. Seu funcionamento é baseado no escoamento de vapor, proveniente da própria caldeira através de uma série de tubos, convertendo a energia do vapor em energia cinética criando uma depressão suficiente para succionar a água e pressurizá-la até o nível de operação da caldeira.

Pressostatos: são dispositivos de segurança que comandam o regime de trabalho das caldeiras, de acordo com a pressão do vapor.

Purificadores de Vapor: são dispositivos auxiliares que tem a finalidade de minimizar o arraste de umidade, sais e sólidos em suspensão.

Válvulas de Segurança: têm como função promover o escape do excesso do vapor caso a pressão de trabalho venha a ser ultrapassada e os outros dispositivos não atuem.

Válvulas: têm como função interromper ou regular a passagem de um fluido.

Tipos de Válvulas:

De retenção: colocadas nas linhas de vapor e óleo para evitar o refluxo;

De extração de fundo (dreno): permite a retirada de impurezas da água que se deposita no fundo do tambor de vapor;

De descarga lenta: tem como função assegurar uma perfeita vedação no sistema;

Solenóide: comandada eletricamente, abre ou fecha a passagem de um fluido;

De alívio: para retirar o excesso de pressão no aquecedor de óleo das caldeiras;

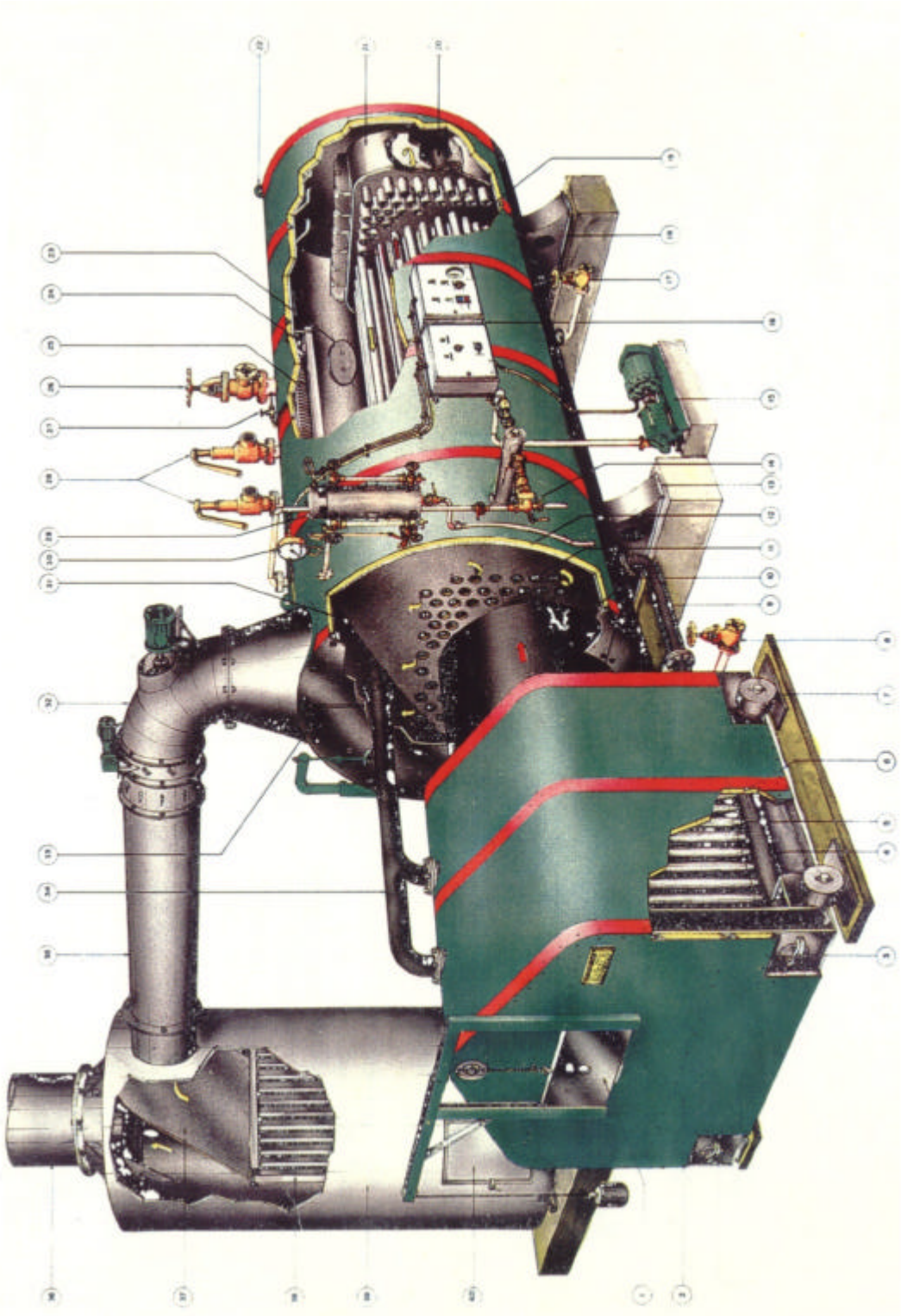
De escape de ar: controla a saída ou entrada de ar na caldeira, no início e no fim das operações;

De serviço: tem seção correspondente a 10% da válvula principal. Tem como função garantir o acionamento de órgãos da caldeira (injetor, aquecimento de óleo, água, etc.);

Visor de Nível: é um tubo de vidro colocado no tambor de vapor, que tem por finalidade dar ao operador a noção exata da altura onde se encontra a água da caldeira.

Figura 3. Caldeira Flamotubular e seus componentes

1	Porta de alimentação da Fornalha	21	Câmara de reversão (imersa em água)
2	Fornalha	22	Olhal de suspensão
3	Tampa de limpeza do Tubulão Inferior	23	Tampa de inspeção
4	Tubulão Inferior	24	Separador de vapor
5	Parede Tubular	25	Separador e coletor de vapor
6	Revestimento e Isolamento Térmico	26	Registro de saída principal do vapor
7	Rodízio para apoio e dilatação	27	Tomada de vapor para os comandos
8	Purga da Fornalha	28	Válvulas de segurança
9	Tubo de circulação de água	29	Corpo de nível
10	Tubulão Central	30	Manômetro
11	Tubos de gases (2 passes)	31	Câmara de gases
12	Revestimento e Isolamento Térmico	32	Exaustor de gases de tiragem modulada
13	Estrutura de apoio (fixa)	33	Tampas da Câmara de gases
14	Injetor de água a vapor	34	Tubo de circulação de vapor
15	Eletro-bomba para alimentação de água	35	Duto horizontal de gases
16	Quadros de comando (automatização)	36	Chaminé
17	Purga da Caldeira	37	Defletor de gases
18	Apoio móvel	38	Retentor de fuligens
19	Tubos de gases (1º passe)	39	Base da Chaminé
20	Tampa de limpeza da câmara de reversão	40	Porta de limpeza da chaminé



Princípio de Funcionamento

Para uma aquotubular: com auxílio de um ventilador, o ar atmosférico passa pelo pré-aquecedor. Já aquecido, o ar vai para a fornalha onde se mistura com o combustível e ocorrendo a combustão. Pelo fenômeno da tiragem, realizado pela chaminé, os gases quentes, produtos da combustão, circulam por todo o gerador até ser lançado na atmosfera. Neste trajeto, ele cede calor para a água dos seguintes modos:

aquecendo a água no economizador;
vaporizando-a na caldeira;
transformando o vapor saturado em vapor superaquecido no superaquecedor.

A maior parcela da energia é absorvida nas superfícies expostas diretamente às chamas na câmara de combustão, onde predomina a troca de calor por radiação. Em caldeiras bem dimensionadas, as paredes d'água representam menos de 10% da superfície de troca de calor total e são capazes de absorver até 50% da energia liberada na combustão. Nas partes posteriores da caldeira, os gases fornecem calor por convecção e radiação gasosa.

Definições

Capacidade de Produção de Vapor

A capacidade de produção de vapor de uma instalação é expressa freqüentemente em quilogramas de vapor por hora (kg/h) e/ou seus múltiplos (kg/s, ton/h). Mas, para valores distintos de temperatura e pressão, o vapor possui quantidades diferentes de energia, por isso, expressa-se a capacidade de uma caldeira em forma de calor total transmitido por unidade de tempo (kcal/h).

Assim:

$$Q = \dot{m}_v \left(h_{TOT} - h_L \right) \qquad \text{(kcal/h)}$$

onde:

Q ≡ capacidade de produção de vapor
$\dot{m}_v$ ≡ vazão mássica de vapor produzido (kg/h)
h_{TOT} ≡ entalpia total do vapor (kcal/kg)
h_L ≡ entalpia da água de alimentação (kcal/kg)

Rendimento Global

É definido com a relação entre o calor transmitido e a energia produzida pelo combustível:

$$h_g = \frac{\dot{m}_v \left(h_{TOT} - h_L \right)}{\dot{m}_c . PCS} .100 \quad (\%)$$

onde:

$\dot{m}_c$ ≡ vazão mássica de combustível queimado (kg/h)

PCS ≡ poder calorífico superior do combustível (kcal/kg)

Velocidade de Combustão

Como o nome já demonstra, expressa:

a quantidade (kg) de combustível queimado por metro quadrado (m^2) de superfície de aquecimento por hora, ou

a quantidade (kg) de combustível queimado por metro cúbico (m^3) de volume de câmara por hora.

Fator de Vaporização

É a relação entre o calor absorvido por 01 (kg) de água de alimentação nas condições da caldeira e o calor absorvido por 01 (kg) de água a 100 (ºC) ao vaporizar.

Vaporização Equivalente

É definido como sendo a vazão de água a 100 (ºC), em (kg/h), que se vaporiza na caldeira:

$$V_E = \frac{\dot{m}_v \left(h_{TOT} - h_L \right)}{543{,}4} \quad \text{(kg/h)}$$

Balanço Térmico

Consiste na elaboração de uma tabela contendo o calor absorvido pelo gerador (desejado) e as perdas ocorridas na combustão. A Figura 04 apresenta o fluxo de energia em um sistema de caldeira.

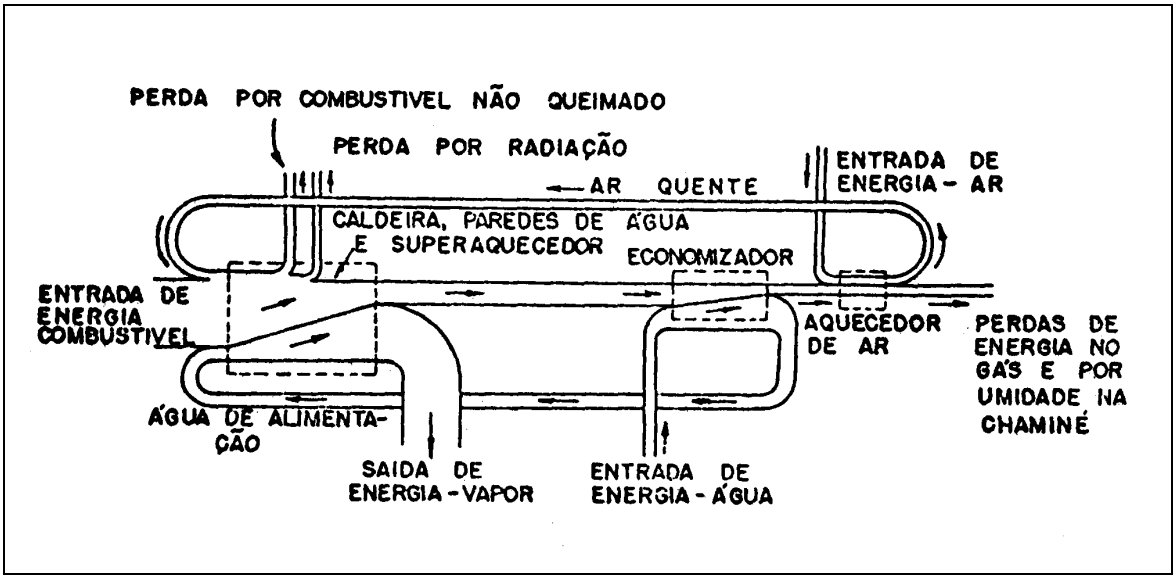

PERDA POR COMBUSTIVEL NÃO QUEIMADO
PERDA POR RADIAÇÃO
AR QUENTE
ENTRADA DE ENERGIA - AR
CALDEIRA, PAREDES DE ÁGUA E SUPERAQUECEDOR
ECONOMIZADOR
ENTRADA DE ENERGIA COMBUSTIVEL
AQUECEDOR DE AR
PERDAS DE ENERGIA NO GÁS E POR UMIDADE NA CHAMINÉ
ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO
SAIDA DE ENERGIA - VAPOR
ENTRADA DE ENERGIA - ÁGUA

Figura 4. Fluxo de Energia em Sistema de Caldeira

Calor Absorvido

É a parcela da energia (calor) que a água e vapor absorveram (deseja-se maximizar). É calculado da seguinte forma:

$$H_L = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_c}\left(h_{TOT} - h_L\right) \qquad \text{(kcal/kg)}$$

onde:

H_L ≡ calor absorvido pela água e vapor por kg de combustível
$\dot{m}_V$ & $\dot{m}_c$ ≡ vazão mássica de vapor e combustível respectivamente (kg/h)

Perdas de Calor

São parcelas de calor liberado na combustão não utilizadas na produção de vapor. As mesmas podem ser classificadas da seguinte forma:

Ocasionais: perdas devido a erros de projeto, de equipamento ou de operação (devem ser minimizadas). Exemplos: perdas no isolamento e nos ventiladores.

Normais: perdas previstas pelo projeto. Exemplos: cinzas, porta da fornalha, etc.

Perdas devido à umidade do combustível

A umidade contida no combustível é vaporizada e deixa a caldeira na forma de vapor superaquecido. Admitindo a sua pressão parcial como sendo 0,07(kgf/^{2}) e sua temperatura igual à dos gases resultantes da combustão, teremos:

$$H_2 = m_u \left(h_g'' - h_L' \right)$$

onde:

H_2 ≡ perdas em (kcal/kg$_c$)
m_u ≡ peso da umidade em (kg/kg$_c$)
h''_g ≡ entalpia do vapor superaquecido {para t_{gases} e P = 0,07 kgf/^{2}} (kcal/kg)
h'_L ≡ entalpia da água na temperatura com que o combustível entra na fornalha (kcal/kg)

Perdas devido à água proveniente da combustão do hidrogênio

O hidrogênio do combustível ao reagir com o oxigênio forma água e esta, por sua vez, deixa a caldeira na forma de vapor superaquecido junto com os gases da combustão.

$$H_3 = 9\phi_{H_2} \left(h_g'' - h_L' \right)$$

onde:

H_3 ≡ perdas em (kcal/kg$_c$)
ϕ_{H_2} ≡ composição graviométrica do hidrogênio (kg/kg$_c$)

Perdas devido à umidade do ar admitido

O ar admitido na caldeira, o comburente da combustão, não é seco. Carrega junto de si vapor de água. Dados sua temperatura de admissão (t_a) e sua umidade relativa (φ), pode-se calcular (ou retirar de uma carta psicrométrica) a umidade absoluta (x) dada em gramas de água por quilogramas de ar seco ($kg_{água}/kg_{ar\ seco}$). Essa água é superaquecida e sai junto com os gases resultantes da combustão.

É calculada por:

$$H_4 = m_s.0,46\left(t_g - t_a\right)$$

onde:

H_4 ≡ perdas em (kcal/kg)
m_s ≡ é calculado multiplicando-se a umidade relativa (φ) pelo peso de água necessário para saturar 01 (kg) de ar seco na temperatura t_a, multiplicado pelo peso do ar seco (m_{as}) gasto por quilograma de combustível (kg_{vapor}/kg_c)

$$m_s = \varphi.m_{sat}.m_{as}$$

sendo que:

$$m_{as} = m_{sg} - C_1 + 8\left(\phi_{H_2} - \frac{\phi_{O_2}}{8}\right)$$

$$m_{sg} = \left[\frac{4\psi_{CO_2} + \psi_{O_2} + 7,00}{3\left(\psi_{CO_2} + \psi_{CO}\right)}\right].\left[\frac{m_c\phi_C - m_r\phi_{C_r}}{m_c}\right]$$

$$\phi_{C_r} = \frac{m_r}{m_c} - A$$

$$C_1 = \frac{m_c\phi_C - m_r\phi_{C_r}}{m_c}$$

sendo:

m_{sg} ≡ peso dos gases secos na saída da caldeira (kcal/kg)
m_c ≡ peso do combustível (kg) ou (kg/h)
m_r ≡ peso das cinzas (kg) ou (kg/h)
ϕ_C ≡ porcentagem de carbono no combustível (%)
ϕ_{C_r} ≡ porcentagem de carbono sem queimar nas cinzas (%)
C_1 ≡ peso do carbono queimado por quilograma de combustível
A ≡ porcentagem de cinzas

0,46 ≡ calor específico médio do vapor desde t_g até t_a (kcal/kg ºC)
t_g ≡ temperatura dos gases na saída da caldeira (ºC)
t_a ≡ temperatura do ar ao entrar na fornalha (ºC)

Perda devido aos gases secos da chaminé

É geralmente mais significativa e pode ser calculada:

$$H_5 = m_{sg}.c_p\left(t_g - t_a\right)$$

onde:

H_5 ≡ perdas em (kcal/kg)
c_p ≡ calor específico médio dos gases $C_p \cong 0{,}24\left(kcal/kg.^oC\right)$

Perda devido ao combustível gasoso sem queimar

Ocorre devido à falta de ar, ocasionando assim uma combustão incompleta. É, em proporções gerais pequena, em relação às outras.

$$H_6 = \frac{\Psi_{CO}}{\Psi_{CO_2} + \Psi_{CO}}.5689{,}6.C_1 \qquad (\text{kcal/kg}_c)$$

Perda devido ao combustível sem queimar contido nas cinzas

Parte do carbono do combustível cai no cinzeiro sem queimar ou parcialmente queimado devido, principalmente ao tipo do carvão, da velocidade de combustão e do tipo de grelha. Assim:

$$H_7 = \frac{8148.m_r.c_e}{m_c}$$

onde:

m_r ≡ peso das cinzas e escórias (kg)
C_e ≡ peso do carbono não queimado ($\text{kg/kg}_{\text{cinzas}}$)

Perda por radiação, hidrogênio e hidrocarbonetos sem queimar

Estas perdas se referem ao calor dissipado pelas paredes da câmara, ao calor sensível dos gases ao saírem para a atmosfera, ao calor sensível das cinzas, à variação de carga na caldeira, etc. Ela nada mais é do que a diferença entre o poder calorífico superior do combustível e o calor absorvido pela caldeira mais as perdas, i. e.:

$$H_8 = PCS - \left(H_L + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 + H_7\right)$$

EXEMPLO: [1]

Em um ensaio realizado numa caldeira queimando carvão, obteve-se o seguinte resultado:

Calor absorvido pela caldeira: H_L = 74,8% do PCS do combustível
Pela análise graviométrica do carvão:

ϕ_C = 62%
ϕ_{H_2} = 4%
ϕ_{N_2} = 1%
ϕ_{O_2} = 8%
ϕ_{S_2} = 14%
umidade = 8%
A = 3% (cinzas)
PCS = 6608 (kcal/kg)

A análise dos gases nos forneceu:
ψCO2 = 13%
ψCO = 1%
ψO2 = 5%
ψN2 = 81%

A temperatura do ar e do combustível ao entrarem na fornalha t_a = 23,2(ºC)
A temperatura dos gases: t_g = 233 (ºC)
Porcentagem de saturação do ar ao entrar na fornalha: 70%
Temperatura do vapor na caldeira: t_v = 182 (ºC)
Vazão mássica de carvão queimado: $\dot{m}_c = 908\left(kg/h\right)$
Cinzas e escórias produzidas: $\dot{m}_r = 190{,}68\left(kg/h\right)$
Carbono sem queimar nas cinzas e escórias: ϕ_{Cr} = 18%
Pressão barométrica: 760 (mmHg)

Fazer o balanço térmico completo da Caldeira por kg de combustível queimado.

Cálculo do peso do carbono no combustível:

$$C_1 = \frac{m_c\phi_C - m_r\phi_{C_r}}{m_c} = \frac{908.0{,}62 - 190{,}68.0{,}18}{908} = 0{,}5822\left(kg_C/kg_c\right)$$

Cálculo do peso dos gases da combustão:

$$m_{sg} = \left[\frac{4\psi_{CO_2} + \psi_{O_2} + 7{,}00}{3\left(\psi_{CO_2} + \psi_{CO}\right)}\right].\left[\frac{m_c\phi_C - m_r\phi_{C_r}}{m_c}\right]$$

$$m_{sg} = \frac{4.0{,}13 + 0{,}05 + 7{,}00}{3(0{,}13 + 0{,}01)}.0{,}5822 = 10{,}494\left(kg_g / kg_c\right)$$

Peso do ar gasto:

$$m_{as} = m_{sg} - C_1 + 8\left(\phi_{H_2} - \frac{\phi_{O_2}}{8}\right)$$

$$m_{as} = 10{,}494 - 0{,}5822 + 8\left(0{,}04 - \frac{0{,}08}{8}\right) = 10{,}15\left(kg_{ar} / kg_c\right)$$

BALANÇO TÉRMICO				
Perdas	Símbolo	Cálculo	kcal/kg	%
Calor absorvido pela caldeira	H_L	0,748 . 6608	4942,78	74,80
Umidade do combustível	H_2	0,08.(709-23,5)	54,84	0,83
Hidrogênio do combustível	H_3	9.0,04. (709-23,5)	246,78	3,73
Umidade do ar	H_4	0,7.0,01815.10,15.0,46.(233-23,2)	12,45	0,19
Gases secos da chaminé	H_5	10,494.0,24. (233-23,2)	528,39	8,00
Combustão incompleta	H_6	$\left[\frac{0{,}01}{0{,}13+0{,}01}\right].5689.0{,}5822$	236,58	3,58
Combustível contido nas cinzas	H_7	$\frac{8148.190{,}7.0{,}18}{908}$	308,03	4,66
Perdas por radiação e outros	H_8	Por diferença	278,15	4,21
		Total	6608,00	100,00

Caldeiras Flamotubulares

Também conhecidas como Pirotubulares, Fogotubulares ou, ainda, como Tubos de Fumaça, são aquelas nas quais os gases da combustão (fumos) atravessam a caldeira no interior de tubos que se encontram circundados por água, cedendo calor à mesma.

Classificação

Existem vários métodos de classificação das caldeiras flamotubulares (segundo o uso, a capacidade, a pressão, a posição da fornalha, a posição dos tubos, os tamanhos, etc.). Adotaremos aqui dividi-las em:

Verticais

- Com fornalha externa
- Com fornalha interna

Horizontais

- Com fornalha externa
- Multitubulares
- Com fornalha interna
- Com uma tubulação central (Cornovaglia)
- Com duas tubulações (Lancashire)
- Locomotivas e Locomóveis
- Escocesas
- Marítimas
- Estacionárias
- Compactas

Caldeira Vertical

É do tipo monobloco, constituída por um corpo cilíndrico fechado nas extremidades por placas planas chamadas espelhos. São várias as suas aplicações por ser facilmente transportada e pelo pequeno espaço que ocupa, exigindo pequenas fundações. Apresenta, porém, baixa capacidade e baixo rendimento térmico. São construídas de 2 até 30 (m^2), com pressão máxima de 10 ($kg/^2$), sendo sua capacidade específica de 15 a 16 kg de vapor por m^2 de superfície de aquecimento.

Apresenta a vantagem de possuir seu interior bastante acessível para a limpeza, fornecendo um maior rendimento no tipo de fornalha interna. São mais utilizadas para combustíveis de baixo poder calorífico.

Caldeira Horizontal

Podem possuir fornalha interna ou externa. Faz-se aqui uma descrição dos diversos tipos de Caldeiras Horizontais.

Caldeira Cornovaglia

Tem funcionamento simples, é constituída por uma tubulação por onde circulam os gases produtos da combustão, transmitindo calor para a água, que o circunda, por contato de sua superfície externa. É, em geral, de grandes dimensões (≅100 m^2), tem baixo rendimento térmico e, devido ao seu tamanho, tem sua pressão máxima limitada a 10 kgf/^{2}. Sua capacidade específica varia de 12 a 14 kg de vapor por m^2 de superfície, Figura 5.

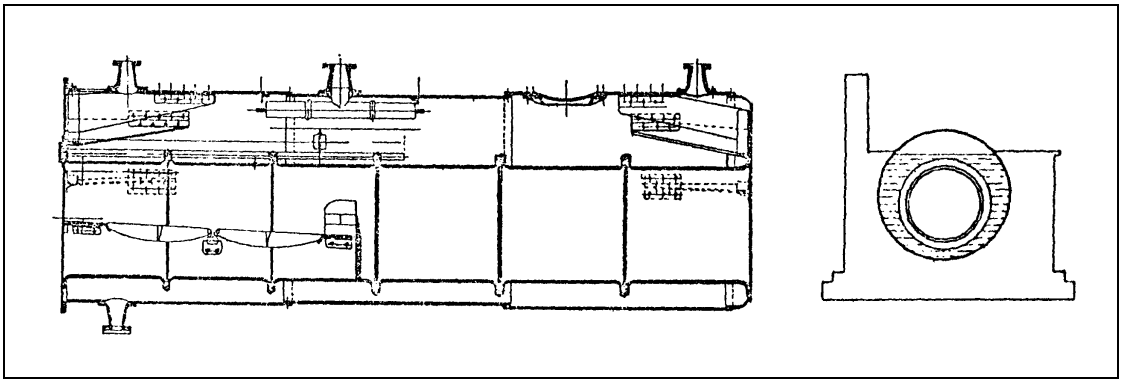


Figura 5. Caldeira Cornovaglia

Caldeira Lancashire

Também conhecida como Caldeira Lancaster, é a evolução da caldeira anterior, possuindo 2 (às vezes 3 ou 4) tubulões internos, alcançando superfície de aquecimento de 120 a 140 m^2. Alguns tipos atingem de 15 a 18 kg de vapor por m^2 de superfície de aquecimento.

Tanto a Caldeira Cornovaglia, como a Lancashire, está caminhando para o desuso devido às unidades modernas mais compactas.

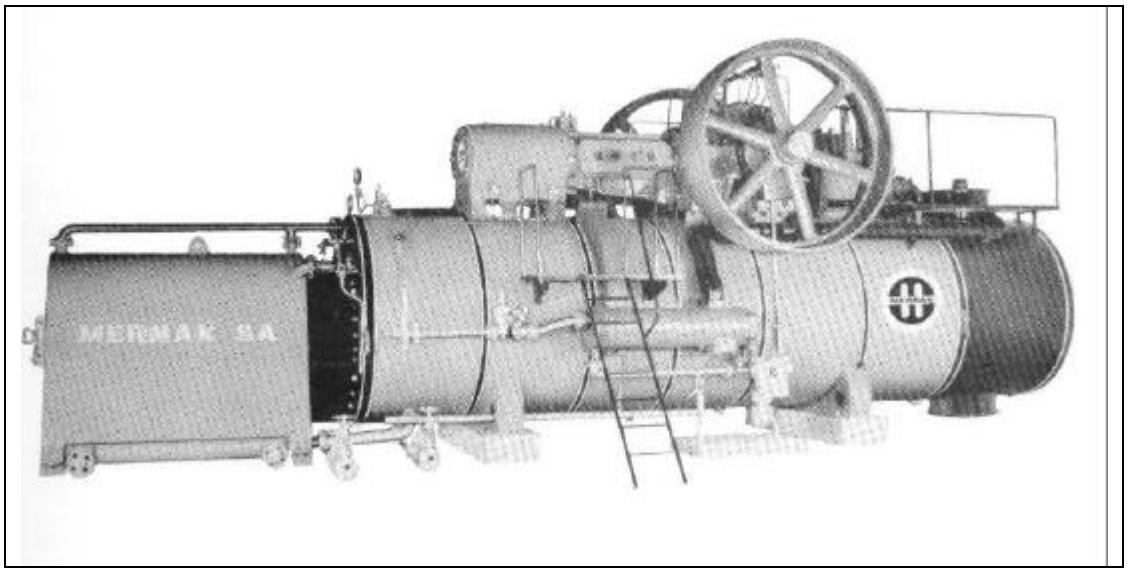
Caldeiras Multitubulares

A substituição dos tubulões das caldeiras anteriores por vários tubos de pequeno diâmetro deram origem à caldeira flamotubular multibular. São encontradas com duas ou três voltas de chama, i.e., os gases de combustão fazem duas ou três voltas no interior da Caldeira.

Os diâmetros dos tubos variam entre 2 ½" e 4", de acordo com a aplicação. Não permitem o uso de fornalha interna, sendo completamente revestida de alvenaria. Sua grande vantagem é permitir a utilização de qualquer combustível, mas devido ao alto custo do refratário, despesas de manutenção e alto custo de instalação, este tipo de caldeira vem tendo sua aplicação industrial diminuída. Sua capacidade máxima é de 600kg de vapor por hora com pressão máxima de 16 kg/^{2}.

Caldeiras Locomotivas & Locomóveis

As caldeiras locomóveis são uma adaptação e modificação das caldeiras locomotivas, Figura 6. Ainda que ideais por fácil mudanças de local por serem portáteis, elas têm limitações no serviço estacionário. São multitubulares com a fornalha revestida completamente por dupla parede metálica formando uma câmara onde circula água, tendo um razoável custo de construção. Possui vantagens de ser portátil, serviço contínuo e excelente, com custo mínimo em condições severas de trabalho, assim como uma grande capacidade de produção de vapor em comparação com seu tamanho. Tem como desvantagens a pequena velocidade de circulação de água e grandes superfícies metálicas. Suportam pressões de 18 $kg/^2$ e chegam até 8000 kg_V/h. Tem aplicação em campos de petróleo, associados a máquinas de vapor na geração de energia, em serrarias, etc.



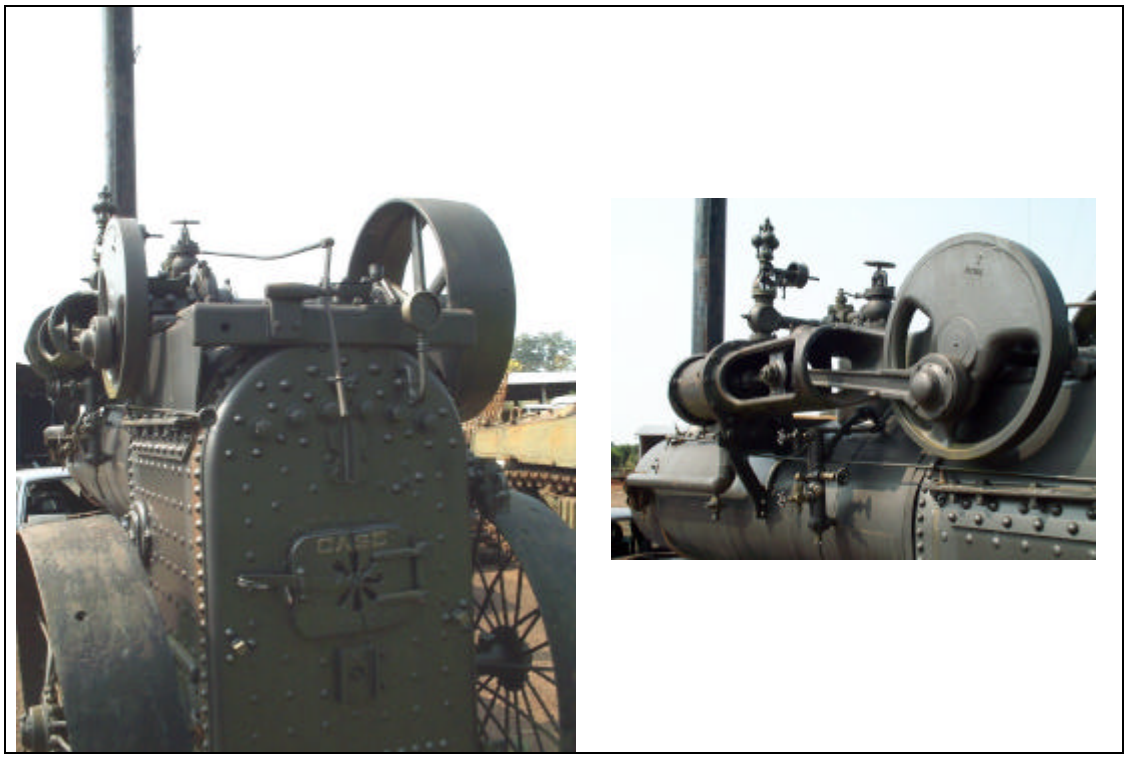


Figura 6. Caldeiras Locomóveis

Caldeiras Escocesas

É o tipo mais moderno e evoluído de caldeiras flamotubulares, Figura 7. Não exige gastos com instalações especiais ou custosas colunas de aço ou alvenaria, bastando uma fundação simples e nivelada, as ligações com a fonte de água, eletricidade e esgoto para entrar imediatamente em serviço. Têm controle eletrônico de segurança e funcionamento automático arrancando tão logo sejam ligados os interruptores. A caldeira consta de um corpo cilíndrico que contém um tubulão sobre o qual existe um conjunto de tubos de pequeno diâmetro. Tem geralmente uma câmara de combustão de tijolos refratários na parte posterior, a que recebe os gases produtos da combustão, e os conduz para o espelho traseiro. Essas unidades operam com óleo ou gás (banha derretida), sendo a circulação garantida por ventiladores (tiragem mecânica). As unidades compactas alcançam elevado rendimento térmico, garantindo 83%. São construídas até a máxima produção de 10 ton_v/h a uma pressão máxima de 18 kg/². Sua vaporização específica atinge valores da ordem de 30 a 34 kg_v/m^2, dependendo da perda de carga oferecida pelo circuito. Os gases circulam com grande velocidade, 20 a 25 m/s, permitindo a obtenção de elevado índice de transmissão de calor. A perda por radiação é muito baixa, não ultrapassando 1%.

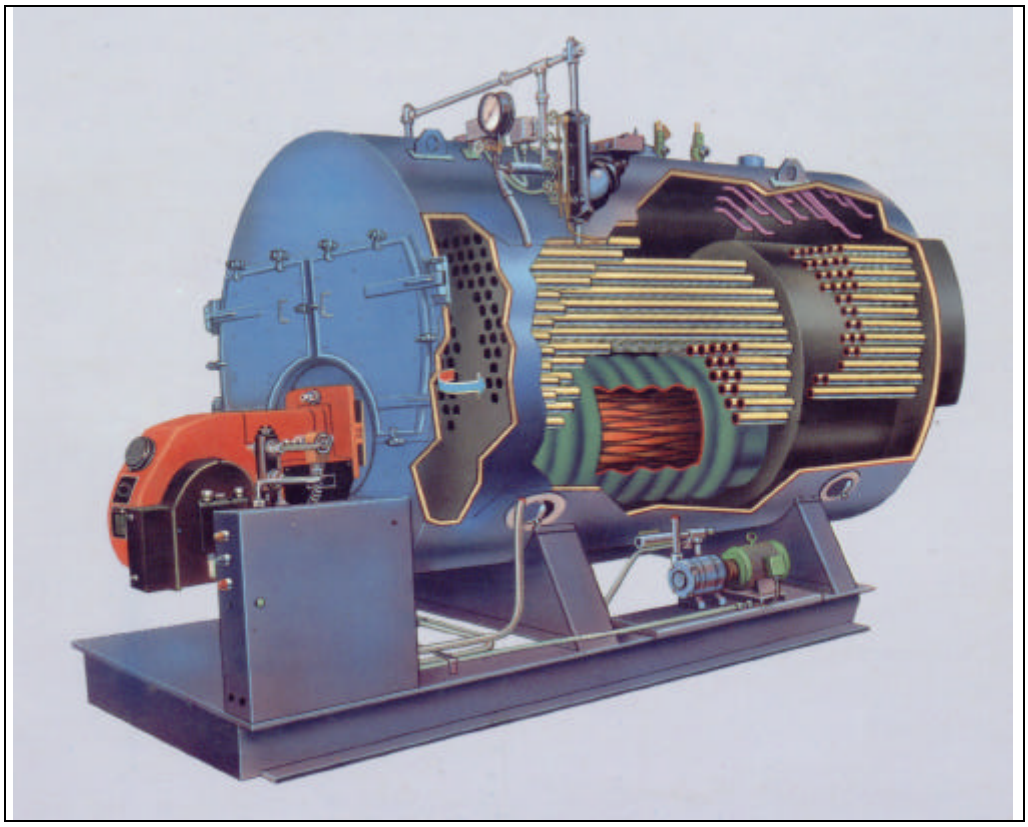


Figura 7. Caldeira Flamotubular Escocesa

Caldeiras Aquatubulares

Caldeiras Aquatubulares

Também conhecidas como Caldeiras Tubos de Água ou Aquatubulares se caracterizam pelo fato dos tubos situarem-se fora dos tubulões da caldeira (tambor) constituindo com estes um feixe tubular. Diferenciam-se das Pirotubulares no fato da água circular no interior dos tubos e os gases quentes se acham em contato com sua superfície externa.

São empregadas quando interessa obter pressões e rendimentos elevados, pois os esforços desenvolvidos nos tubos pelas altas pressões são de tração ao invés de compressão, como ocorre nas pirotubulares, e também pelo fato dos tubos estarem fora do corpo da caldeira obtemos superfícies de aquecimento praticamente ilimitadas.

Os objetivos a que se propõe uma caldeira aquotubular abrangem uma grande faixa e em vista disto temos como resultado muitos tipos e modificações, tais como tubos retos, tubos curvos de um ou vários corpos cilíndricos, enfim a flexibilidade permitida possibilita vários arranjos.

Classificação

Como vimos as caldeiras aquotubulares poderiam ser classificadas de diversas maneiras, mas iremos dividi-las em:

1 Caldeiras de tubos retos
2 Caldeiras de tubos curvos
3 Caldeiras de circulação forçada

Caldeiras de Tubos Retos

Podendo possuir tambor transversal ou longitudinal, estas caldeiras são ainda bastante utilizadas devido, entre outras coisas, a possuírem fácil acesso aos tubos para fins de limpeza ou troca, causarem pequena perda de carga, exigirem chaminés pequenas, e porque também todos os tubos principais são iguais necessitando de poucas formas especiais.

As Figuras 08 e 09 mostram dois exemplos de caldeiras aquotubulares com tubos retos de tambor longitudinal e transversal respectivamente.

Os tubos de água, normalmente de 4, são inclinados de aproximadamente 22º, sendo ligados nas extremidades aos coletores também chamados câmaras onduladas (ver Fig. 09), formando com o tubulão um circuito fechado por onde circula a água que entra pela parte inferior do tambor, desce pelo interior do coletor posterior e sobe pelos tubos inclinados onde se forma o vapor. A mistura de vapor e água ascende rapidamente pelo coletor frontal retornando ao tambor onde tem lugar a separação entre o vapor e a água.

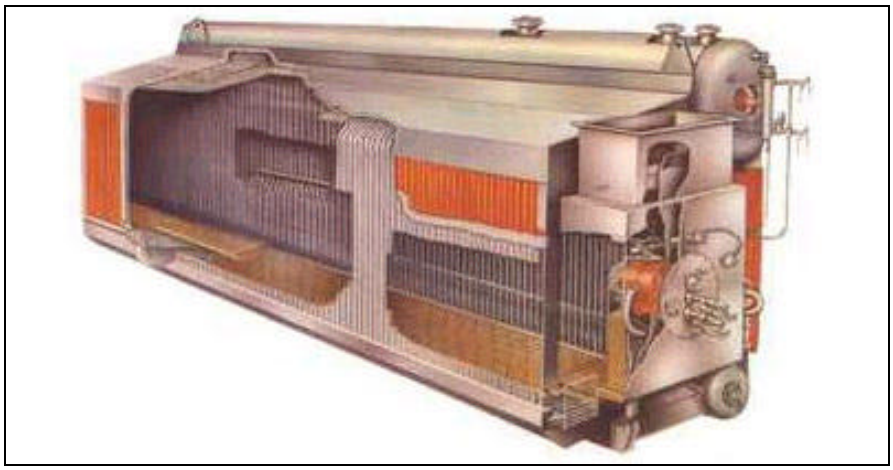


Figura 8. Caldeira de Tubo Reto com Tambor Longitudinal

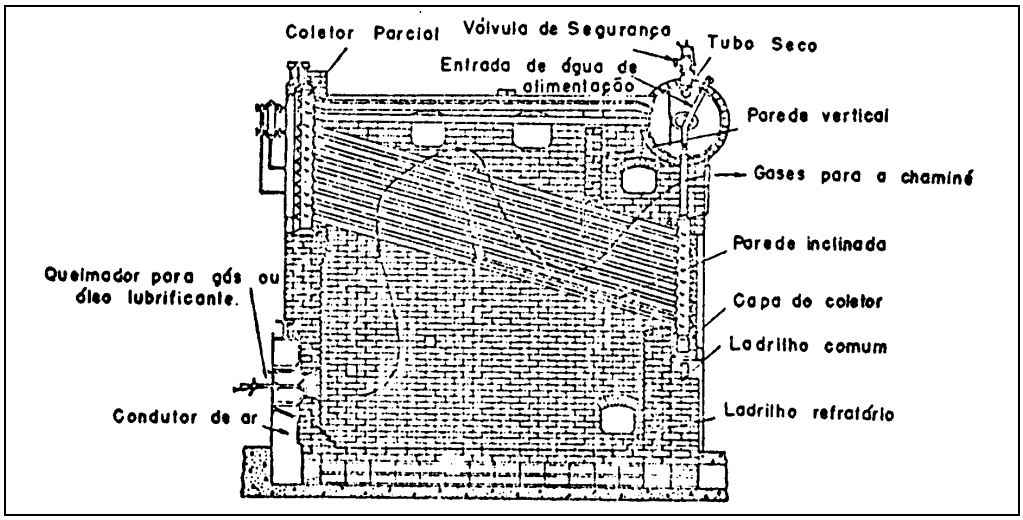


Figura 9. Caldeira de Tubo Reto com Tambor Transversal

Estas caldeiras podem ser adaptadas à produção de energia e possuem um apreciável volume de água, fator importante para várias aplicações. Sua superfície de aquecimento varia de 67 a 1.350 m², com pressões de até 45 kg/² para capacidades variando de 3 a 30 tv/h.

Seu inconveniente, se restringe no fato de que os tubos terminam em coletores cujas paredes devem estar em esquadro com a linha central dos tubos para que as juntas de vapor possam se encaixar aos extremos dos tubos contra as paredes dos coletores, e por possuírem baixa vaporização específica, da ordem. de 20 a 25 kg.v/m2.

Caldeiras de Tubos Curvos

A utilização de vapor em centrais térmicas exigia geradores de grande capacidade de produção e com isto as caldeiras de tubos curvos, devido à sua ilimitada capacidade de produzir vapor, tomaram uma posição de grande importância para casos desta natureza.

São compostas por tubos curvos ligados à tambores e suas concepções iniciais possuíam quatro e até cinco tambores, sendo revestidos completamente por alvenaria.

Atualmente, por motivos de segurança, economia e para eliminar o uso de peças de grande diâmetro, o número de tambores foi reduzido a dois (2) e com um único tambor,

sendo este último aplicado a unidade de altas pressões e capacidades. As paredes de refratário, representavam um custo enorme das instalações por isto desenvolveu-se estudos quanto a um melhor aproveitamento do calor irradiado, e a aplicação de paredes de água veio eliminar o uso destes custosos refratários. Com o maior proveito do calor gerado, alem de reduzir o tamanho da caldeira, promove-se uma vaporização mais rápida e aumenta-se a vida do revestimento das câmaras de combustão.

Este tipo de caldeira encontra uma barreira para sua aceitação comercial no que se refere ao fato de exigirem um controle especial da água de alimentação (tratamento da água), embora apresente inúmeras vantagens, tais como, manutenção fácil para limpeza ou reparos, rápida vaporização, sendo o tipo que atinge maior vaporização especifica com valores de 28 a 30 kg.v/m² nas instalações normais, podendo atingir até 50kg.v/m² nas caldeiras de tiragem forçada.

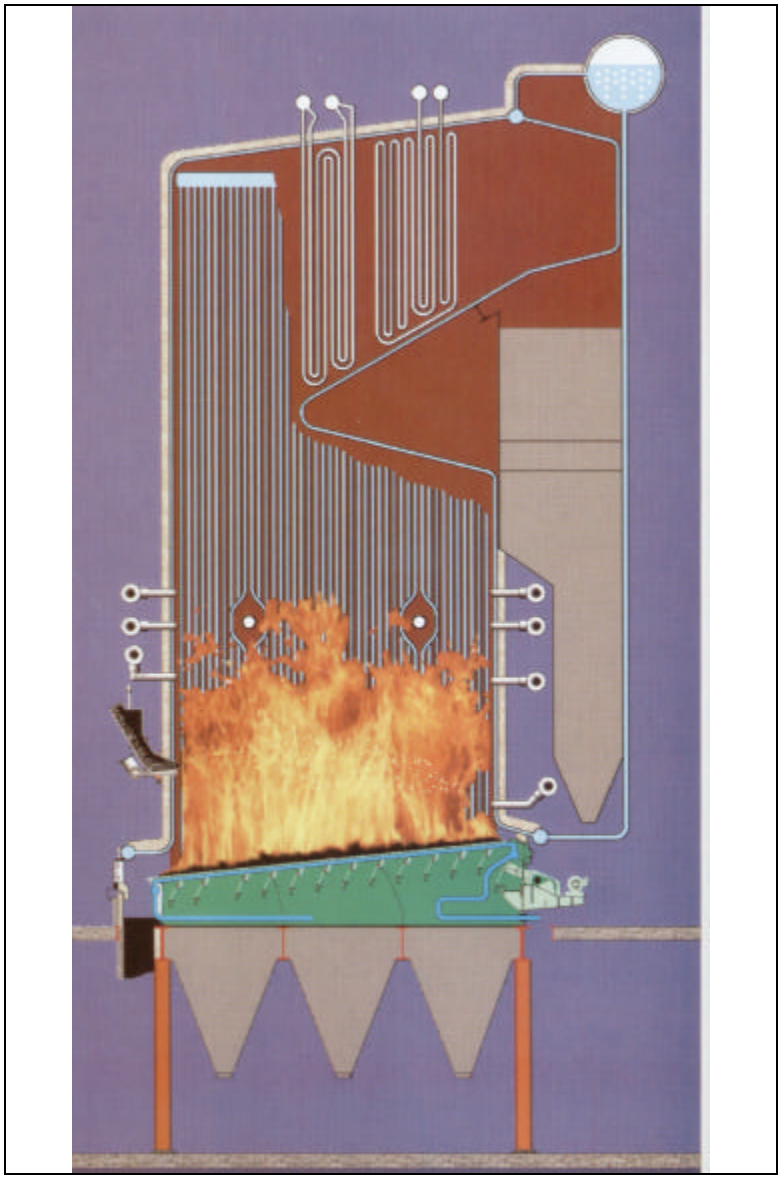


Figura 10. Caldeira Aquatubular com Tambor Transversal

Caldeiras com Circulação Forçada

A diferença de pesos específicos da água de alimentação fria, com a água aquecida e misturada com bolhas de vapor promove uma circulação natural da água no interior dos tubos. Fatores como incrustações, variações de carga, etc., acabam por tornar-se obstáculos a esta circulação, portanto, apesar de vários cuidados tomados, não se consegue uma circulação orientada, ou como é chamada, uma circulação positiva. Baseado nisto substituiu-se a circulação por gravidade pela circulação forçada por uma bomba de alimentação e com isto reduz-se o diâmetro dos tubos, aumenta-se o circuito de tubos e estes podem dispor-se em forma de uma serpentina contínua formando o revestimento da fornalha, melhorando-se a transmissão de calor e reduzindo-se o tamanho dos tambores, coletores e tornando mínimo o espaço requerido.

Foi Mark Benson da Siemens alemã o autor deste tipo de caldeira, que se caracterizava pelo fato de não utilizarem bomba de recirculação ou tambor, trabalhando com pressões super - críticas, exigindo assim um controle rigoroso.

Aproveitando calor do superaquecedor (~4%) para a água de alimentação, a Sulzer apresentou seu modelo trabalhando com uma pressão a 140 kg/² e com sensíveis aparelhos para controlar o superaquecimento desejado através do controle da combustão e da circulação de água.

Baseados no modelo da Sulzer, a La Mont e a Velox desenvolveram seus modelos chamados de “circulação favorecida” por possuírem uma bomba de recirculação que trabalha no primeiro caso com pressões superiores à da caldeira de 40lb/pol² em média, tendo aplicação satisfatória em caldeiras de recuperação consumindo menos de 1% da energia produzida.

Na caldeira Velox, que alcança rendimento térmico de até 90% e por isto vem adquirindo grande aceitação na Europa, os gases da câmara de combustão são comprimidos de 1 a 2 kg/crn^{2} por meio de um ventilador acionado por uma turbina a gás que utiliza os gases de escape da caldeira. Devido a compressão, ha um aumento da densidade dos gases e de sua velocidade até valores próximos a 200 m/s, melhorando-se assim a transmissão de calor em alguns casos com coeficientes 15 vezes maiores que nos casos comuns. Por este motivo a caldeira requer aproximadamente l/4 do espaço e pesa um sétimo (1/7) do- valor de geradores convencionais de mesma capacidade de produção de vapor. Outras vantagens atribuídas a este tipo são uma resposta rápida aos controles e rápida entrada em funcionamento (5 a 7 minutos), alcançando uma vaporização especifica de ate 500 kg.v/m².h.

A Figura 10 representa uma caldeira de circulação forçada com recirculação. O vapor produzido e a água sem vaporizar entram em um cilindro vertical no qual canais centrífugos dirigem a água para o fundo e o vapor saturado sobe pelo centro. A água volta a entrar na bomba de circulação de onde é injetada no gerador de novo.

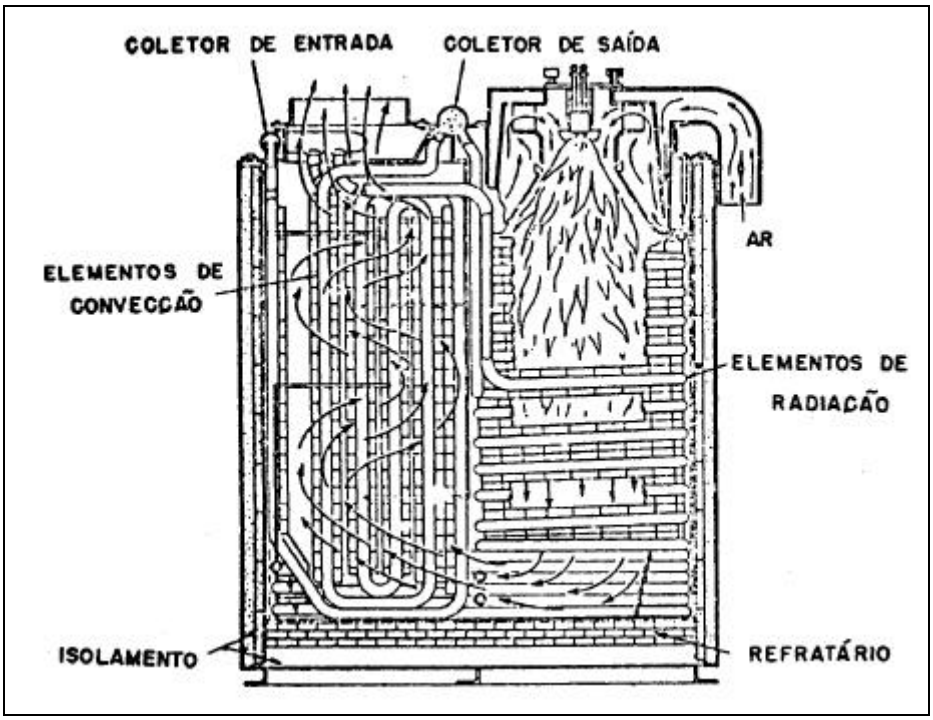


Figura 11. Caldeira de Circulação Forçada

Um gerador deste tipo produz aproximadamente 2.750 kg.v/h ocupando um espaço de 2,1 x 2,1m.

As caldeiras de circulação forçada devido, entre outras coisas, a serem mais leves, formarem vapor praticamente seco ou superaquecido e instantaneamente, ocuparem menor espaço e possuírem grandes coeficientes de transmissão de calor, pareciam tomar conta completamente do mercado, porém o seu uso apresentou certos inconvenientes como super sensibilidade, paradas constantes por mínimos problemas, etc., o que levou La Mont a elaborar juntamente com W. Vorkauf um outro tipo sem bomba de alimentação (circulação natural), porém com tubulão ligado à tubos de grande diâmetro que por sua vez se ligam ao feixe de troca de calor de tubos com diâmetros menores (Figura 11). Este tipo teve grande aceitação dos usuários pois aproveitou as vantagens das caldeiras de circulação forçada e eliminou os defeitos das mesmas.

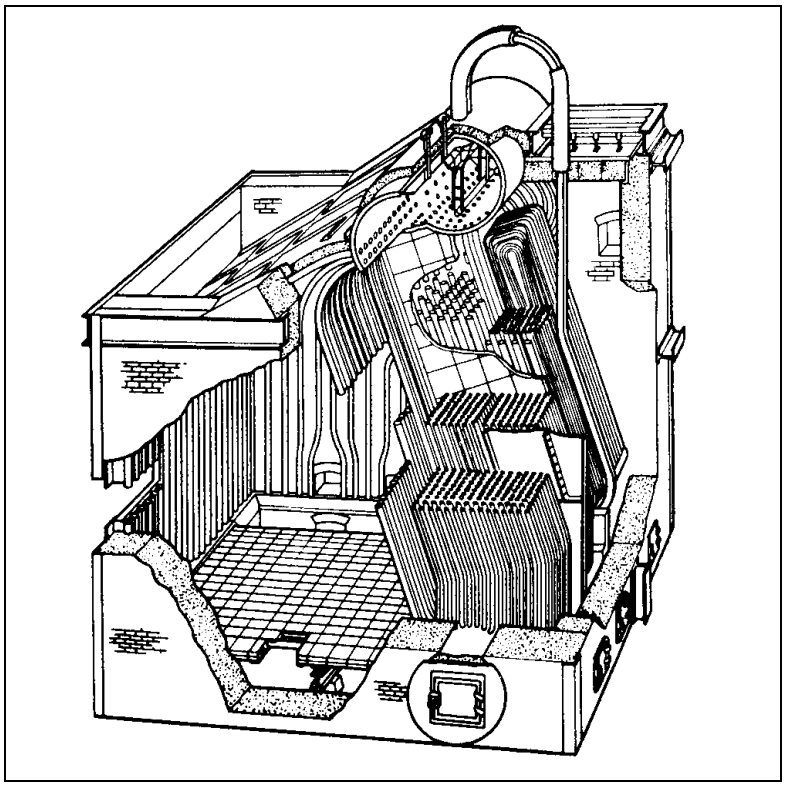


Figura 12. Caldeira de Circulação Natural

Aplicação e Utilização das Caldeiras Aquotubulares

As caldeiras tubos de água perseguem os mesmos objetivos de uma caldeira qualquer, isto é, custo reduzido, compacta cidade, ser acessível, tubos com formas simples, boa circulação, coeficiente de transmissão de calor elevado e alta capacidade de produção de vapor. Poderia se dizer que este tipo atinge todos ou quase todos dos objetivos pretendidos como por exemplo a sua limpeza é facilmente realizada pois as incrustações são retira das sem dificuldade utilizando um dispositivo limpa-tubo movido com água ou ar.

Elas possuem as mais variadas aplicações industriais sendo também usadas para caldeiras de recuperação e aplicações marítimas, tipo este estudado com maiores detalhes por Engenheiros Navais porém destacamos sua utilização em centrais térmicas onde trabalham com elevadas pressões de ate 200 kg/2 e capacidades atingindo valores de aproximadamente 800 t.v/h.

Com respeito às grandes centrais térmicas, não e raro um alto consumo de combustíve1 e por isto qualquer aumento de rendimento, por menor que seja, torna-se econômico mesmo se os investimentos aplicados forem grandes. Em caldeiras de pressões elevadas, devido aos grandes esforços aplicados, os tambores resultam um custo muito elevado por isto conclui-se que seu número e tamanho deva ser o menor possível, e isto é função dos seguintes fatores.

- Rendimento
- Tipo de combustível
- Natureza da carga
- Pressão de trabalho
- Ampliações futuras

- Espaço disponível e
- Condições do clima

Em resumo, as caldeiras aquotubulares são empregadas quase exclusivamente quando interessa obter elevadas pressões grandes capacidades e altos rendimentos.

Bibliografia - Parte 1

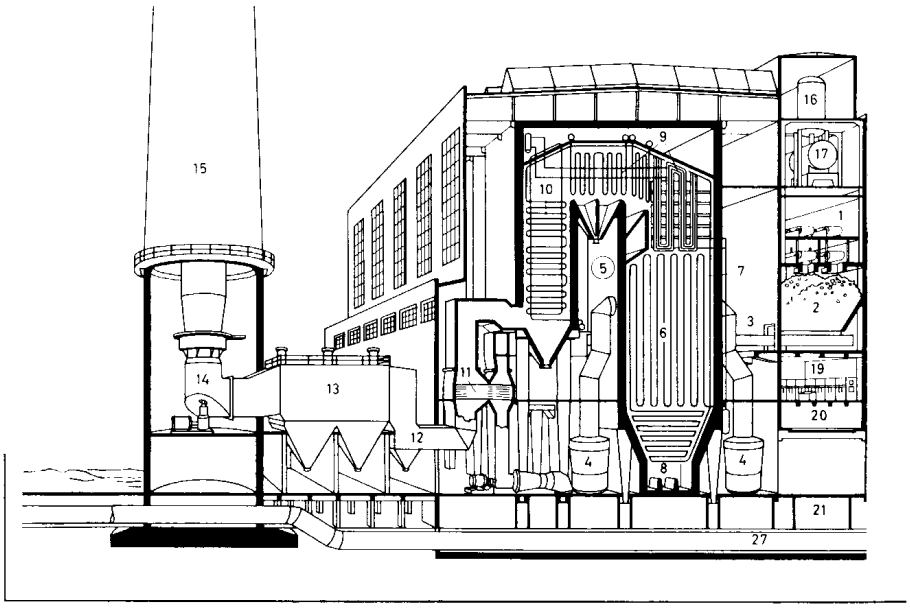
[1] FLÔRES, L. F. Valadão. *Sistemas Térmicos I* – Apostila EFEI, Itajubá, MG.

[2] MARTINELLI Jr., L. C. *Geradores de Vapor – Recepção, Operação e Medidas de Segurança*. Cadernos UNIJUÍ, Série Tecnologia Mecânica, n.º 8, Editora Unijuí, Ijuí, RS, 1998.

[3] BAZZO, Edson. *Geração de Vapor*. Editora da UFSC, Florianópolis, SC.

[4] TORREIRA, Raul Peragallo. *Fluidos Térmicos - Água, Vapor, Óleos Térmicos.* Editora Hemus. São Paulo.

[5] BERTASO, Henrique D'Ávila. *Segurança para Operadores de Caldeiras.* SENAI - RS. 1994



1–28 steam-generating station, an electric power plant
1–21 boiler house
1 coal conveyor
2 coal bunker
3 travelling-grate (*Am.* traveling-grate) stoker
4 coal mill
5 steam boiler, a water-tube boiler (radiant-type boiler)
6 burners
7 water pipes
8 ash pit (clinker pit)
9 superheater
10 water preheater
11 air preheater
12 gas flue
13 electrostatic precipitator
14 induced-draught (*Am.* induced-draft) fan
15 chimney (smokestack)
16 de-aerator
17 feedwater tank
18 boiler feed pump
19 control room
20 cable tunnel
21 cable vault
22 turbine house
23 steam turbine with alternator
24 surface condenser
25 low-pressure preheater
26 high-pressure preheater (economizer)
27 cooling water pipe
28 control room
29–35 outdoor substation, a substation
29 busbars
30 power transformer, a mobile (transportable) transformer
31 stay poles (guy poles)
32 high-voltage transmission line
33 high-voltage conductor
34 air-blast circuit breaker (circuit breaker)
35 surge diverter (*Am.* lightning arrester, arrester)
36 overhead line support, a lattice steel tower
37 cross arm (traverse)

Figura 13. Termos em Inglês para Caldeiras (Boilers)

Parte 2 - Recepção, Ensaio e Operação

RECEPÇÃO

A especificação correta de uma unidade Geradora de Vapor deve partir da encomenda.

A recepção oficial de uma caldeira, deve ser acompanhada de uma série de elementos, como sejam:

a) Durante a fabricação:

- certificados de qualidade dos materiais empregados na construção da caldeira;
- certificados de testes hidráulicos;
- certificados de exame de soldas elétricas, com raio X, raios gama ou ultra-som;
- certificado de alívio de tensões;
- cálculo de dimensionamento das partes solicitadas a pressão;

b) Durante a montagem:

- verificação da qualidade dos materiais entregues;
- inspeção durante a montagem;
- certificado do teste hidráulico, após conclusão da instalação da caldeira;
- aferição dos instrumentos de medição;

c) Após instalação completa:

- preparação da unidade para ensaio finais;
- ensaio de performance (produção de vapor) e eficiência térmica;

A inspeção pode ser feita por funcionário do próprio quadro técnico do comprador, ou mediante contrato com firmas especializadas. Quando da montagem, deve-se prestar toda atenção para que a caldeira tenha todos os seus elementos instalados de plena conformidade com os projetos.

Ensaio de Performance e Eficiência Térmica

A execução de um ensaio satisfatório e conclusivo se consegue, mediante uma preparação dos:

a) necessário recursos, de forma a assegurar correta medição do vapor formado, ou de água consumida;

b) medição do título de vapor, ou sua temperatura, quando for superaquecido;

c) medição da pressão de vapor;

d) medição do combustível, quando sólido em peso, quando líquido volume;

e) medição da temperatura de saída dos gases da combustão, do ar, da água e do combustível líquido;

f) medição do teor de CO_2, O_2 e CO, nos gases de combustão;

g) tiragem na base da chaminé;

h) determinação das características do combustível.

A medição do vapor se faz com aparelhos registradores. Quando não se dispõe desta aparelhagem, adota-se um tanque de preferência retangular onde se mede o volume d'água consumido pela caldeira.

Ao se medir a produção, pela água consumida, deve-se ter vários cuidado tais como:

- eliminação de vazamento na gacheta das bombas, nas válvulas de segurança do economizador;

- fechamento perfeito das válvulas de descarga intermitente e contínua.

O volume de água consumido à produção de vapor.

A medição do CO_2, O_2 e se processa com o aparelho de orsat, ou aparelhos registradores.

A medição da eficiência do combustível pode ser avaliada por 2 métodos: método direto e método indireto.

O método direto consiste em medir quantidades de vapor produzido e combustível consumido. Desde que se conhecem os demais elementos que caracterizam o vapor e o combustível, a eficiência se calcula pela expressão:

$$\varphi = \frac{D.\left(h_v - t_a\right)}{pci \cdot B}$$

D - descarga do vapor em kg/h

h_v - entalpia do vapor

t_a - temperatura d'água de alimentação ºC

pci - poder calorífico inferior do combustível em kcal.kg

B - consumo de combustível em kg

O método indireto apóia-se na perda de calor sensível dos gases da combustão que abandonam a caldeira.

A perda de calor sensível, somada à perda de combustível e à perda da combustão, digo irradiação, fornecem a perda total do gerador.

$P_t = P_g + P_c + P_i$

$P_g = V_g \,.\, C_{pm} \,.\, (ts - tar)$ kcal/h

V_g - volume total dos gases produzidos pelo combustível, nas condições normais de pressão, temperatura Nm^3/h

C_{pm} - calor específico médio dos gases kcal/m^3 hºC

ts - temperatura de saída dos gases ºC

ta - temperatura do ar ºC

A perda de irradiação é dado construtivo e necessariamente indicado pelo fabricante do gerador. A eficiência se estabelece por:

$\varphi = 100 - p$

A duração do ensaio é de 8 horas para combustíveis sólidos, e de 2 horas para geradores com óleo combustível.

OPERAÇÃO DE GERADORES DE VAPOR

Uma unidade geradora de vapor deve estar permanentemente em boas condições de operação e preservação.

Há um mínimo de prescrição que deveriam ser do pleno conhecimento dos operadores de caldeiras, a saber:

1º - Inspecionar diariamente o corpo de nível, promovendo a descarga do indicador de nível, das torneiras de prova e do próprio corpo de nível.

Quando se constata algum defeito NUNCA SE DEVE INJETAR ÁGUA imediatamente no interior da caldeira. Deve-se apagar o fogo e esfriar a caldeira, para evitar explosões.

2º - Testar diariamente a válvula de segurança, constatando se abre e fecha automaticamente sem desprender vapor a pressão inferior a sua operação. Esta operação deve ser feita com cuidado para não desnivelar o contrapeso da válvula.

3º - Descarregar diariamente a caldeira, conforme prescrições de tratamento de água.

4º - Manter os vidros indicadores de nível, aparelhos indicadores em geral, perfeitamente limpos, a fim de evitar erros de leitura. Se o vidro de nível internamente estiver embaçado, na primeira parada semanal deve-se limpá-lo.

5º - Não exceder à pressão de trabalho da caldeira, para evitar salvas da válvula de segurança.

6º - No caso de operar com óleo combustível, NUNCA APROVEITAR A INCANDESCÊNCIA DA FORNALHA, para acender novamente (reacender) o queimador. Cada vez que acender o queimador, deve-se introduzir uma tocha.

7º - Extrair uma amostra de água de alimentação e de descarga diariamente, para controle de tratamento.

INSPEÇÃO DA CALDEIRA A VAPOR

Cabe ao técnico, digo, ao departamento técnico acompanhar o estudo geral da caldeira. Quando o usuário não possui elemento qualificado para proceder a esta inspeção recomenda-se contratar uma firma reconhecida e especializada. Recomenda-se acompanhar as normas NB - 55.

Medidas de Segurança

Caldeiras de Combustíveis Sólidos

Os cuidados a serem tomados ao operar estes equipamentos variam de acordo com as características dos mesmos. Caldeiras de grande produção de vapor, com muitos dispositivos de controle e segurança, exigem mais do operador. Entretanto, todas as Caldeiras exigem acompanhamento constante. Seguem abaixo algumas dessas precauções.

Antes de Acender a Caldeira

Verifica-se o nível de água no tanque de abastecimento;

Verificam-se as posições das válvulas de entrada de água na bomba;

Verifica-se se a bomba está ligando e desligando;

Drenam-se os indicadores de nível (garrafa e visor) e testa-se o sistema de alarme;

Drena-se o distribuidor de vapor e superaquecedor (quando for o caso);

Dá-se uma descarga de fundo rápido, observa-se se a válvula está fechando convenientemente;

Assegura-se que a quantidade de combustível, nas proximidades, seja suficiente para a alimentação do fogo durante um razoável espaço de tempo (aproximadamente duas horas);

Ateia-se fogo e, ao alimentar a Caldeira, toma-se precauções para evitar danos ao refratário e grelhas.

No Funcionamento da Caldeira

Quando a pressão do vapor estiver próxima à pressão de trabalho, evita-se o “golpe de aríete” abrindo-se lentamente a válvula de vapor;

Observa-se atentamente o manômetro e o indicador de nível, ajustando-os, se necessário, aos padrões de segurança;

O Operador não deve afastar-se do local de trabalho. Não é recomendado que o Operador da Caldeira execute outras atividades;

Dá-se descarga de fundo conforme recomendações de tratamento da água;

Faz-se as **anotações diárias** e verifica-se o funcionamento de todos os equipamentos e acessórios;

Evite-se queimar lixo ou outro material estranho, pois pode ocasionar: entupimento das grelhas, superaquecimentos, explosões na fornalha, ...

Dá-se descarga manual nas válvulas de segurança, no mínimo, uma vez por dia;

Em caldeiras aquotubulares, limpa-se os tubos com soprador de fuligem;

Tanto para caldeiras manuais como automáticas, não se deve perder de vista o controle do nível da água.

Adiciona-se corretamente os produtos para tratamento da água;

Segue-se as instruções CIPA e colabora-se com ela;

Mantém-se limpo e em ordem o local de trabalho;

Aciona-se o sistema alternativo de abastecimento de água (injetor/burrinho);

Faz-se o controle de tiragem de CO_2 da combustão.

Caldeiras de Combustíveis Líquidos

Nas Caldeiras de combustível líquido, todos os dispositivos para combustão (bombas de óleo, ignição, etc.), bombas d’água e os sistemas de bloqueio e alarme, estão ligados a um painel de comando e a um programador. Embora automáticos, estes dispositivos podem vir a falhar, reforçando a importância da norma que adverte o operador a não abandonar o seu posto de trabalho.

Antes de Ligar a Caldeira

Verifica-se os níveis dos tanques de água e de óleo combustível;

Verifica-se se as válvulas da rede de óleo estão abertas;

Liga-se o aquecedor de óleo e controla-se a temperatura;

Drenam-se os controladores de nível (garrafa e visor), certificando-se, também, de que a bomba esteja ligando e desligando;

Drena-se o distribuidor de vapor e a serpentina do aquecedor de óleo;

Verifica-se o posicionamento dos eletrodos de ignição;

Verifica-se o estado das correias do ventilador;

Verifica-se o compressor, lubrificação, refrigeração;

Ventila-se a fornalha para evitar acúmulos de gases explosivos.

No Funcionamento da Caldeira

Quando a pressão estiver próxima à pressão de trabalho, evita-se o “golpe de aríete” abrindo-se lentamente a válvula de saída de vapor ou distribuidor;

Observa-se constantemente os manômetros do óleo, vapor e ar;

Observa-se constantemente a temperatura do óleo;

Verifica-se se os depósitos de água e de óleo estão sendo suficientemente abastecidos;

Observa-se a lubrificação do compressor;

Dá-se descarga de fundo conforme recomendação do tratamento de água;

Observa-se a combustão através dos visores e da chaminé (se não apagou);

Faz-se as anotações referentes aos equipamentos e acessórios, e observa-se o seu funcionamento com atenção;

Mantém-se limpa a Casa de Caldeiras;

Aciona-se os sistemas alternativos de abastecimento de água (injetor/burrinho);

Inspeciona-se vazamentos ou possíveis obstruções que possam existir no sistema de alimentação de água, ar ou combustíveis;

Faz-se o controle de tiragem de CO_2 da combustão;

Segue-se as recomendações da CIPA e colabora-se com ela;

Quando parar a Caldeira, no caso de utilizar BPF, circula-se óleo diesel ou querosene pela tubulação de óleo combustível até o queimador. Nesta operação **evita-se a circulação de óleo diesel ou querosene pelo tanque aquecedor**.

Caso o queimador apagar subitamente durante a operação normal da Caldeira, jamais utilize-se o calor das paredes ou de tochas para acendê-lo;

Controlar a mistura combustível/comburente, evitando a formação de fumaça branca (excesso de ar) ou fumaça preta (excesso de óleo).

Cuidados Especiais

Além das medidas de segurança indicadas anteriormente, coloca-se em seguida cuidados referentes a duas situações críticas às Caldeiras.

Nível de Água do Reservatório Alto

No caso do nível da água ficar muito alto, o vapor arrastará consigo água (líquida), prejudicando a sua qualidade e danificando possíveis equipamentos ligados a linha de vapor.

Ocorrendo isso, em qualquer tipo de Caldeira**, em primeiro lugar e antes de qualquer outro ato, drena-se os indicadores de nível, para certificar-se da situação**. Caso confirmado o fato, dá-se descargas de fundo para ajustar o nível da água aos padrões normais de operação da Caldeira.

Nível de Água do Reservatório Baixo

É a mais séria e a mais freqüente das emergências em Caldeiras. As causas poder ser falhas na bomba de alimentação, vazamentos no sistema, válvulas defeituosas, falhas no automático e no alarme de falta de água, etc. Quando faltar água na Caldeira, a superfície imersa na água fica reduzida. A ação do calor provocará deformações nos tubos, vazamentos, danos no refratário e, no pior dos casos, uma explosão[1].

Itauba

Figura 14. Fotos de Explosões

Procedimentos a serem seguidos

Caldeiras de Combustível Sólido

Drena-se os indicadores de nível para ter certeza da existência ou não de água no interior do vaso;

Interrompe-se o fornecimento de água para a Caldeira. Deve-se impedir que esta operação seja executada pois poderá ocorrer um choque térmico;

Fecha-se a saída de gases e a entrada de ar da Caldeira. Ao se interromper o fornecimento de oxigênio, cessa a combustão;

[1] Em uma Caldeira, que esteja trabalhando à pressão de 10 kg/cm^2, com 20.000 kg de água no nível de trabalho e uma câmara de 6 m^3, o vapor está a 183,2 ºC. Demostra-se que cada 50 kg de água, nestas condições, possuem uma força explosiva equivalente à detonação de 1 kg de pólvora. No exemplo, 400 kg de pólvora. [2]

Não se deve tentar apagar o fogo com água ou extintores;

Fecha-se a válvula de saída de vapor e observa-se o manômetro. Se a pressão aumentar, descarrega-se manualmente as válvulas de segurança;

A Caldeira deve esfriar lentamente. Dependendo do tempo que a estrutura ficou exposta ao calor, o técnico responsável deverá inspecionar a Caldeira, conforme determinação da NR-13.

Caldeiras de Combustível Líquido

Drena-se os indicadores de nível para ter certeza da existência ou não de água no interior do vaso;

Corta-se o óleo dos queimadores;

Corta-se a alimentação de água, fechando os registros;

Ventila-se a fornalha para retirar os gases;

Fecha-se a saída do vapor, observando o manômetro. Se a pressão aumentar, descarrega-se manualmente as válvulas de segurança;

Não se coloca água na Caldeira;

A Caldeira deverá esfriar lentamente e, dependendo do tempo que a tubulação ficou exposta ao calor, sugere-se que o técnico responsável inspecione a mesma, conforme determina a NR-13.

Bibliografia – Parte 2:

[1] GIESELER, Ilvo Wilson; ROTTA, Humberto *(Obra de nome desconhecido)*

[2] TORREIRA, Raul Peragallo. *Fluidos Térmicos - Água, Vapor, Óleos Térmicos.* Editora Hemus. São Paulo.

[3] BERTASO, Henrique D'Ávila. *Segurança para Operadores de Caldeiras.* SENAI - RS. 1994

Parte 3 - NR-13 Caldeiras e Vasos de Pressão

13.1 CALDEIRAS A VAPOR - DISPOSIÇÕES GERAIS

13.1.1 Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo.

O vapor pode ser usado pela indústria em diversas condições tais como: baixa pressão, alta pressão, saturado, superaquecido etc. Ele pode ser produzido também por diferentes tipos de equipamentos nos quais estão incluídas as caldeiras.

Para efeito da NR-13 serão considerados como "caldeiras" todos os equipamentos que simultaneamente geram e acumulam, vapor de água ou outro fluido. Unidades instaladas em veículos, tais como: caminhões e navios deverão respeitar esta norma regulamentadora nos itens que forem aplicáveis e para os quais não exista normalização ou regulamentação mais específica.

Não deverão ser entendidos como caldeiras os seguintes equipamentos:

1º. Trocadores de calor do tipo "Reboiler", "Kettle", "Refervedores", "TLE", etc. Cujo projeto de construção é governado por critérios referentes a vasos de pressão;

2º. Equipamentos com serpentina sujeita a chama direta ou gases aquecidos e que geram, porém não acumulam vapor, tais como: fornos, geradores de circulação forçada e outros.

3º. Serpentinas de fornos ou de vasos de pressão que aproveitam o calor residual para gerar ou superaquecer vapor;

4º. Caldeiras que utilizam fluido térmico e não o vaporiza.

A seguir, a título ilustrativo, mostra-se algumas imagens dos equipamentos mencionados anteriormente.

13.1.2 Para efeito desta NR, considera-se "Profissional Habilitado" aquele que tem competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento de operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras e vasos de pressão, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no País.

Com relação aos itens da NR-13 onde se faz menção ao “Profissional Habilitado”, na data de elaboração deste documento, tem-se que:

O Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia (CONFEA) é o órgão responsável pela definição da competência e pelo esclarecimento de dúvidas referentes ao assunto;

Em conformidades com a Lei 5.194 de 24/12/66, a resolução nº 218 de 29/06/73 do CONFEA, a decisão normativa nº 029/88 do CONFEA e a decisão normativa nº 045/92 do CONFEA são considerados “Profissionais Habilitados” os profissionais da área de Engenharia Mecânica e de Engenharia Naval bem como os engenheiros civis com atribuições do artigo 28 do decreto federal 23.569/33 que tenham cursado as disciplinas de “Termodinâmica e suas Aplicações” e “Transferência de Calor” ou equivalentes com denominações distintas, independente do número de anos transcorridos desde sua formatura;

Para atender o artigo 188 da CLT e também a Lei 5.194 de 24/12/66 o registro no conselho regional de profissionais, citadas no item “2º” acima, é a única comprovação necessária a ser exigida do “Profissional Habilitado”;

Os comprovantes de inscrição emitidos anteriormente para esse fim pelas DRTs / MTb, não possuem mais validade;

Engenheiros de outras modalidades que não as prescritas no item “2º”, devem requerer ao CREA, caso haja interesse pessoa, que estude suas habilidades para inspeção de caldeiras e vasos de pressão, em função de seu currículo escola;

Laudos, Relatórios e Pareceres terão valor legal quando assinados por “Profissional Habilitado”.

Conforme estabelecido pelo CONFEA/CREA as empresas prestadoras de serviço que se propõem a executar as atividades prescritas neste subitem são obrigadas a se registrar no CREA, indicando Responsável Técnico legalmente habilitado.

O “Profissional Habilitado” pode ser consultor autônomo, empregado de empresa prestadora de serviço ou empregado da empresa proprietária do equipamento.

13.1.3 Pressão Máxima de Trabalho Permitida - PMTP ou Pressão Máxima de Trabalho Admissível - PMTA é o maior valor de pressão compatível com o código de projeto, a resistência dos materiais utilizados, as dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais.

Esta NR não inclui regras para projeto e pressupõe que os equipamentos são construídos de acordo com normas e códigos de reconhecimento internacional.

A pressão máxima de trabalho admissível - PMTA é calculada ou determinada utilizando-se fórmulas e tabelas disponíveis no código de projeto da caldeira. Essas fontes levam em consideração:

- As dimensões e geometria de cada parte específica da caldeira (por exemplo: diâmetro, espessura, etc).

- Resistência dos materiais (valores de tensão máxima admissível dependentes da temperatura).

- Outros fatores específicos para cada situação.

É importante destacar que o valor da PMTA pode alterar-se ao longo da vida da caldeira em função da redução da resistência mecânica dos materiais, redução de espessuras dos diferentes componentes etc. A atualização dos valores da PMTA deve ser feita, em conformidade com procedimentos escritos existentes no prontuário da caldeira.

Quando ocorrer alteração no valor da PMTA da caldeira deverão ser executados os ajustes necessários nas pressões de abertura das válvulas de segurança na placa de identificação e outros elementos de controle dependente deste valor.

13.1.4 Constitui risco grave e iminente a falta de qualquer um dos seguintes itens:

a) válvula de segurança com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior a PMTA;
b) instrumento que indique a pressão do vapor acumulado;
c) injetor ou outro meio de alimentação de água, independente do sistema principal, em caldeiras a combustível sólido;
d) sistema de drenagem rápida de água, em caldeiras de recuperação de álcalis,
e) sistema de indicação para controle do nível de água ou outro sistema que evite o superaquecimento por alimentação deficiente.

As válvulas de segurança, mesmo que ajustadas para abertura na PMTA deverão:

- Ser adequadamente projetadas
- Ser adequadamente instaladas
- Ser adequadamente mantidas

Para casos onde estas premissas não forem atendidas a válvula de segurança será considerada como inexistente.

A quantidade e o local de Instalação das válvulas de segurança deverão atender aos códigos ou normas técnicas aplicáveis.

De acordo com o código ASME seção I é permissível um acréscimo de pressão, durante a descarga, (com a válvula já aberta) de no máximo 6% da PMTA.

A existência de pelo menos um instrumento que indique a pressão do vapor acumulado pressupõe que este esteja corretamente especificado, instalado e mantido;

O mostrador do instrumento indicador de pressão pode ser analógico ou digital e poderá ser instalado na própria caldeira ou na sala de controle;

Entende-se por sistema de indicação de nível de água qualquer dispositivo com função equivalente aos visores de coluna de água. Caso a coluna de água não consiga ser lida corretamente por problemas de vazamento ou bloqueio, deverá ser imediatamente acionado o procedimento de paralisação da caldeira.

Exemplos de manômetro, válvulas de segurança e visor de nível.

13.1.5 Toda caldeira deve ter afixada em seu corpo, em local de fácil acesso e bem visível, placa de identificação indelével com, no mínimo, as seguintes informações:

a) fabricante;
b) número de ordem dado pelo fabricante da caldeira;
c) ano de fabricação;
d) pressão máxima de trabalho admissível;
e) pressão de teste hidrostático;
f) capacidade de produção de vapor;
g) área da superfície de aquecimento;
h) código de projeto e ano de edição.

Além das informações mencionadas no item 13.1.5 a placa poderá conter outras informações a critérios do estabelecimento.

A placa de identificação deve ser fabricada de material resistente às intempéries tais como: alumínio, bronze, aço inoxidável etc, possuir caracteres gravados de forma indelével, devendo ser fixada ao corpo da caldeira através de rebites, parafusos ou soldas.

A placa de identificação deverá ser afixada em local de fácil acesso e visualização. Deve-se tomar cuidado para que a placa não seja fixada em partes que possam ser removidas da caldeira tais como: bocas de visita, chapas de isolamento térmico, etc.

De acordo com o decreto lei 81.621 de 03 de maio de 1978, o Brasil é signatário do Sistema Internacional de Unidades. a tabela a seguir apresenta os fatores de conversão a serem utilizados para conversão das unidades de pressão.

Tabela para Conversão de Unidades de Pressão

bar	kgf/cm^2	psi (lbf/pol^2)	mmHg	mH_20	kPa kN/m^2
1	1,019716	14,503	750,062	10,19716	100
0,980665	1	14,2233	735,560	10,00	98,0665
0,068947	0,070307	1	51,715	0,70307	6,89475
1,33322	1,3595	19,368	1000	13,59	133,322
0,09806	0,1000	1,42233	73,556	1	9,80665
0,0100	0,01019	0,14503	7,50062	0,10197	1
Em conformidade com o Sistema Internacional de Unidades. A unidade oficial para pressão no Sistema SI é o Pascal (Pa).					

13.1.5.1 Além da placa de identificação devem constar, em local visível, a categoria da caldeira, conforme definida no subitem 13.1.9 desta NR, e seu número ou código de identificação.

Além da placa de identificação toda caldeira deverá apresentar seu número ou código de identificação e sua respectiva categoria.

Essas informações poderão ser pintadas em local de fácil visualização, com dimensões tais que possam ser facilmente percebidas à distância (Por exemplo: 10 metros).

Opcionalmente à pintura direta, informações poderão fazer parte de uma placa com visualização equivalente.

13.1.6 Toda Caldeira deve possuir no estabelecimento onde estiver instalada, a seguinte documentação, devidamente atualizada:

a) "Prontuário da Caldeira", contendo as seguintes informações:
- código de projeto e ano de edição;
- especificação dos materiais;
- procedimentos utilizados na fabricação, montagem, inspeção final e determinação da PMTA;
- conjunto de desenhos e demais dados necessários para o monitoramento da vida útil da caldeira;
- características funcionais;
- dados dos dispositivos de segurança;
- ano de fabricação;
- categoria da caldeira.

b) "Registro de Segurança", em conformidade com o item 13.1.7;

c) "Projeto de Instalação", em conformidade com o item 13.2;

d) “Projetos de Alteração ou Reparo”, em conformidade com os subitens 13.4.2 e 13.4.3;

e) “Relatórios de Inspeção”, em conformidade com os subitens 13.5.11, 13.5.12 e 13.5.13.

Caso o estabelecimento onde estiver instalada a caldeira possuir diversas unidades fabris, distantes umas das outras, os documentos deverão estar disponíveis na unidade onde a caldeira estiver instalada para que possam ser facilmente consultados;

Em função das peculiaridades de cada estabelecimento, não é necessário que toda documentação seja arquivada num mesmo local. É recomendável porém que todos os documentos que compõem o prontuário da caldeira estejam agrupados.

O procedimento para determinação da PMTA, deverá explicar o roteiro para seu estabelecimento, passo a passo, incluindo tabelas, ábacos etc, que por ventura devam ser consultados;

Entende-se por vida útil da caldeira o período de tempo entre a data de fabricação e a data na qual tenha sido considerada inadequada para uso.

A documentação deve ser mantida durante toda a vida útil do equipamento.

13.1.6.1 Quando inexistente ou extraviado, o “Prontuário da Caldeira” deve ser reconstituído pelo proprietário, com responsabilidade técnica do fabricante ou de “Profissional Habilitado”, citado no subitem 13.1.2, sendo imprescindível a reconstituição das características funcionais, dos dados dos dispositivos de segurança e dos procedimentos para determinação da PMTA.

A maior parte da documentação exigida, particularmente aquela englobada no prontuário da caldeira, deve ser fornecida o mais detalhadamente possível, pelo fabricante da caldeira.

Se o Estabelecimento não possuir essa documentação, parte dela deverá ser reconstituída. Quando não for possível reconstituir alguns itens, tais como: procedimentos utilizados na fabricação e montagem, especificações de materiais etc, deverão ser reconstituídos pelo menos as características funcionais da caldeira, os dados de seus dispositivos de segurança e o procedimento para determinação da PMTA.

A reconstituição dos documentos será sempre de responsabilidade do proprietário da caldeira. Para tanto, este poderá utilizar-se dos serviços do fabricante da caldeira ou caso este seja indeterminado ou já não exista, de um “Profissional Habilitado” ou empresa especializada.

13.1.6.2 Quando a caldeira for vendida ou transferida de estabelecimento, os documentos mencionados nas alíneas “a”, “d” e “e” do subitem 13.1.6 devem acompanhá-la.

O Registro de Segurança também poderá acompanhar a caldeira a critério do estabelecimento onde ela esteve instalada.

O Projeto de Instalação não acompanha a caldeira porque deverá ser elaborado um novo projeto, característico das novas instalações.

13.1.6.3 O proprietário da caldeira deverá apresentar, quando exigido pela autoridade competente do Órgão Regional do Ministério do Trabalho, a documentação mencionada no subitem 13.1.6.

A autoridade competente do Órgão Regional do Ministério do Trabalho (Delegacia Regional do Trabalho - DRT) é o Delegado Regional do Trabalho na sua jurisdição.

13.1.7 O “Registro de Segurança” deve ser constituído de livro próprio, com páginas numeradas, ou outro sistema equivalente onde serão registradas:

a) todas as ocorrências importantes capazes de influir nas condições segurança da caldeira;
b) as ocorrências de inspeções de segurança periódicas e extraordinárias, devendo constar o nome legível e assinatura de “Profissional Habilitado”, citado no subitem 13.1.2, e de operador de caldeira presente na ocasião da inspeção.

O “Registro de Segurança” deve ser constituído por um livro com páginas numeradas exclusivo para cada caldeira.

É possível que a empresa utilize outro sistema (por exemplo: informatizado) desde que, de fato, apresente a mesma segurança contra burla e permita assinatura nas ocasiões indicadas e que seja de fácil consulta.

É importante que sejam registrados neste livro somente as ocorrências relacionadas à caldeira que possam afetar, positiva ou negativamente, a integridade física do ser humano.

É prática nas unidades industriais o preenchimento do “Livro de Turno” ou “Livro de passagem de serviço”, ou similar, que poderá ser aceito como “Registro de Segurança” desde que atenda o disposto no item 13.1.7.

São exemplos típicos de ocorrências importantes: as explosões, incêndios, vazamentos, ruptura de componentes da caldeira, operação em condições fora daquelas

previstas pelo projeto, paradas de emergência, realização de testes na caldeira e dispositivos de segurança etc.

Por ocasião da inspeção da caldeira o “Profissional Habilitado”, contratado pelo estabelecimento para fazer a inspeção da caldeira ou o “Profissional Habilitado” existente no serviço próprio de inspeção, deverá anotar no “Registro de Segurança” a data e tipo da inspeção de segurança da caldeira que está sendo inspecionada.

O “Profissional Habilitado” deverá solicitar a assinatura do operador da caldeira ou, na sua ausência, de outro operador, no referido “Registro de Segurança”.

A assinatura tem por objetivo comprovar que a caldeira está sendo inspecionada e não implica em qualquer responsabilidade por parte do operador na atividade de inspeção.

O preenchimento do livro e respectiva assinatura, por ocasião das inspeções, deverá ser feito durante o período em que a caldeira estiver sendo inspecionada.

13.1.7.1 Caso a caldeira venha a ser considerada inadequada para uso, o “Registro de Segurança” deve conter tal informação e receber encerramento formal.

Caso a caldeira venha ser considerada inadequada para uso futuro, o respectivo “Registro de Segurança” deverá apresentar claramente os motivos pelos quais esta sendo adotada tal decisão. O encerramento formal do “Registro de Segurança” deverá ser feito por um “Profissional Habilitado” e comunicado através de Relatório de Inspeção de Segurança Extraordinária à “Representação Sindical da Categoria Profissional Predominante no Estabelecimento” conforme estabelecido no item 13.5.12 e ao órgão regional do MTb caso este tenha exigido a apresentação dos documentos da caldeira anteriormente, conforme previsto no subitem 13.1.6.3.

Recomenda-se para estes casos que a caldeira seja inutilizada, antes do descarte, para evitar uso posterior.

13.1.8 A documentação referida no subitem 13.1.6 deve estar sempre à disposição para consulta dos operadores, do pessoal de manutenção, de inspeção e das representações dos trabalhadores e do empregador na Comissão Interna de Prevenção de Acidentes - CIPA, devendo o proprietário assegurar pleno acesso a essa documentação.

A documentação referida no subitem 13.1.6 deverá estar sempre disponível dentro do estabelecimento.

Nos casos onde for necessária a retirada da documentação do estabelecimento, deverá ser providenciada a sua duplicação.

13.1.9 Para os propósitos desta NR, as caldeiras são classificadas em 3 categorias conforme segue:

a) caldeiras da categoria “A” são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm2);

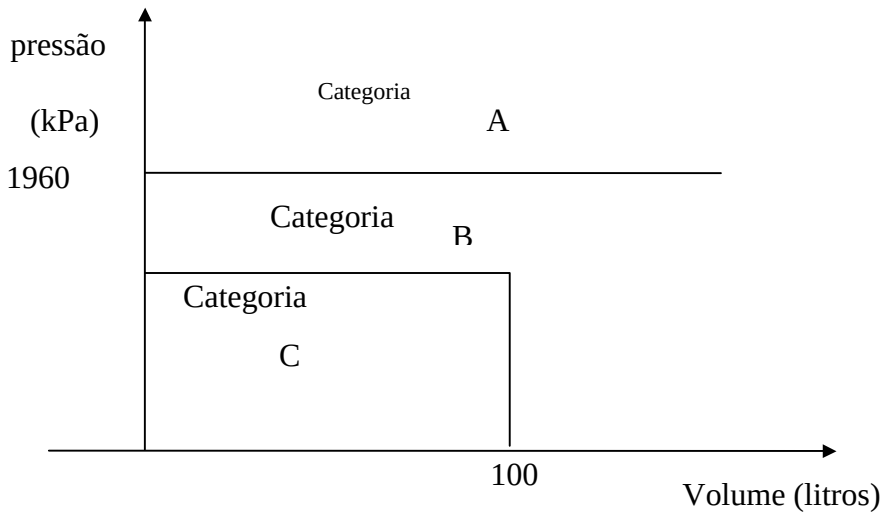
b) caldeiras categoria “C” são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5,99 kgf/cm2) e o volume é igual ou inferior a 100 litros;

c) caldeiras categoria “B” são todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

O critério adotado por esta NR, para classificação de caldeiras, leva em conta a pressão de operação e o volume interno da caldeira. Esse conceito, também adotado por outras normas internacionais, representa a energia disponível em uma caldeira. Desta forma quanto maior a energia maiores serão os riscos envolvidos. A capacidade de produção de vapor da caldeira (ton/h, kg/h) não é indicativo do risco já que não considera a pressão do vapor produzido ou o volume de vapor armazenado.

A subdivisão em 3 (três) categorias distintas facilita a adoção de critérios diferenciados compatíveis com o risco apresentado por cada caldeira.

O gráfico abaixo representa os campos que foram adotados para cada categoria de caldeiras.



13.2 INSTALAÇÃO DE CALDEIRAS A VAPOR

13.2.1 O “Projeto de Instalação” de caldeiras a vapor, no que concerne ao atendimento desta NR, é de responsabilidade de “Profissional Habilitado”, conforme citado no subitem 13.1.2, e deve obedecer os aspectos de segurança, saúde e meio ambiente previstos nas Normas Regulamentadoras, convenções e disposições legais aplicáveis.

autoria de projeto de instalação de caldeiras é de responsabilidade de “Profissional Habilitado”.

Sempre que na elaboração do projeto o “Profissional Habilitado” solicitar a participação de profissionais, especializados e legalmente habilitados, estes serão tidos como responsáveis na parte que lhes diga respeito, devendo ser explicitamente mencionados como autores das partes que tiverem executado.

O projeto de instalação deverá conter todos os documentos, plantas, desenhos, cálculos, pareceres, relatórios, análises, normas, especificações relativos ao projeto, devidamente assinados pelos profissionais legalmente habilitados.

13.2.2 As caldeiras de qualquer estabelecimento devem ser instaladas em “Casa de Caldeiras” ou em local específico para tal fim, denominado “Área de Caldeiras”.

Deverá ser entendido como “Casa de Caldeiras” um local reservado do estabelecimento, delimitado por paredes ou divisórias e devidamente coberto onde estejam instaladas as caldeiras.

Deverá ser entendido como “Área de Caldeiras” um local reservado para instalação das caldeiras em uma unidade de processo. Este local, geralmente é destinado à instalação de caldeiras e outros equipamentos de utilidades ficando diretamente exposto à ação do tempo.

A opção pela instalação das caldeiras em Área ou Casa de Caldeiras será definida na fase de projeto e independente das dimensões da Caldeira ou de seus parâmetros operacionais.

13.2.3 Quando a caldeira for instalada em ambiente aberto, a “Área de Caldeiras” deve satisfazer os seguintes requisitos:

a) estar afastada no mínimo 3 metros de:
- outras instalações do estabelecimento;
- de depósitos de combustíveis, executando-se reservatórios para partida com até 2.000 (dois mil) litros de capacidade;
- do limite de propriedade de terceiros;
- do limite com as vias públicas.

b) dispor de pelo menos 2 (duas) saídas amplas, permanentemente desobstruídas e dispostas em direções distintas;

c) dispor de acesso fácil e seguro, necessário à operação e manutenção de caldeira, sendo que, para guarda corpos vazados, os vãos devem ter dimensões que impeçam a queda de pessoas;

d) ter sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado, provenientes da combustão, para fora da área de operação, atendendo às normas ambientais vigentes;

e) dispor de iluminação conforme normas oficiais vigentes;

f) ter sistema de iluminação de emergência caso operar a noite.

Deve ser entendido como sistema de iluminação de emergência todo sistema que em caso de falha no fornecimento de energia elétrica, consiga manter adequadamente iluminados os pontos estratégicos à operação da caldeira. São exemplos destes sistemas lâmpadas ligadas a baterias que se autocarregam nos períodos de fornecimento normal, geradores movidos a vapor ou motores a combustão etc.

13.2.4 Quando a caldeira estiver instalada em ambiente confinado, a "Casa de Caldeiras" deve satisfazer os seguintes requisitos:

- constituir prédio separado, construído de material resistente ao fogo, podendo ter apenas uma parede adjacente à outras instalações do estabelecimento, porém com as outras paredes afastadas de, no mínimo 3 (três) metros de outras instalações, do limite de propriedade de terceiros, do limite com as vias públicas e de depósitos de combustíveis, executando-se reservatórios para partida com até 2.000 (dois mil) litros de capacidade;
- dispor de pelo menos 2 (duas) saídas amplas, permanentemente desobstruídas e dispostas em direções distintas;
- dispor de ventilação permanente com entradas de ar que não possam ser bloqueadas;
- dispor de sensor para detecção de vazamento de gás quando se tratar de caldeira a combustível gasoso;
- não ser utilizada para qualquer outra finalidade;
- dispor de acesso fácil e seguro, necessário à operação e à manutenção da caldeira, sendo que, para guarda-corpos vazados, os vãos devem ter dimensões que impeçam a queda de pessoas;
- ter sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado, provenientes da combustão, para fora da área de operação, atendendo às normas ambientais vigentes;
- dispor de iluminação conforme normas oficiais vigentes e ter sistema de iluminação de emergência.

13.2.5 Constitui risco grave e iminente o não atendimento aos seguintes requisitos:

- para todas as caldeiras instaladas em ambiente aberto, as alíneas “b”, “d” e “f” do subitem 13.2.3 desta NR;

- para as caldeiras da categoria “A” instaladas em ambientes confinados, as alíneas “a”, “b”, “c”, “d”, “e”, “g”, e “h” do subitem 13.2.4 da NR.

- para caldeiras das categorias “B” e “C” instaladas em ambientes confinados, as alíneas “b”, “c”, “d”, “e”, “g” e “h” do subitem 13.2.4 desta NR.

13.2.6 Quando o estabelecimento não puder atender ao disposto nos subitens 13.2.3 ou 13.2.4 deverá ser elaborado “Projeto Alternativo de Instalação”, com medidas complementares de segurança que permitam a atenuação dos riscos.

Caso o estabelecimento não possa atender às exigências estabelecidas nos subitens 13.2.3 ou 13.2.4 ou obedecer a aspectos de segurança, saúde e meio ambiente previstos nas NR, nas convenções ou nas disposições legais deverá elaborar um “projeto alternativo” contendo medidas concretas para atenuação dos riscos.

Este requisito se aplica tanto às instalações existentes como para novas instalações.

13.2.6.1 O “Projeto Alternativo de Instalação” deve ser apresentado pelo proprietário da caldeira para obtenção de acordo com a representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento.

13.2.6.2 Quando não houver acordo, conforme previsto no subitem 13.2.6.1, a intermediação do órgão regional do MTb, poderá ser solicitada por qualquer uma das partes e, persistindo o impasse, a decisão caberá a esse órgão.

13.2.7 As caldeiras classificadas na categoria “A” deverão possuir painel de instrumentos instalados em sala de controle, construída segundo o que estabelecem as Normas Regulamentadoras aplicáveis.

Toda caldeira classificada como categoria “A” deve possuir painel de instrumentos ou console de sistema digital instalado em sala de controle. No caso de estabelecimentos com mais de uma caldeira é permitida a instalação dos instrumentos de todas as caldeiras na mesma sala de controle.

O projeto e construção da sala de controle devem atender aos requisitos estabelecidos pelas Normas Regulamentadoras.

13.3 SEGURANÇA NA OPERAÇÃO DE CALDEIRAS

13.3.1 Toda caldeira deve possuir “Manual de Operação” atualizado, em língua portuguesa, em local de fácil acesso aos operadores, contendo no mínimo:

a) procedimentos de partidas e paradas;
b) procedimentos e parâmetros operacionais de rotina;
c) procedimentos para situações de emergência;
d) procedimentos gerais de segurança, saúde e de preservação do meio ambiente.

O manual de operação da caldeira (ou das caldeiras) deve estar sempre disponível para consulta dos operadores, em local próximo ao posto de trabalho. Os manuais devem ser mantidos atualizados sendo que todas as alterações ocorridas nos procedimentos operacionais ou nas características das caldeiras, deverão ser de pleno conhecimento de seus operadores e prontamente incorporados aos respectivos manuais.

13.3.2 Os instrumentos e controles de caldeiras devem ser mantidos calibrados e em boas condições operacionais, constituindo condição de risco grave e iminente o emprego de artifícios que neutralizem sistemas de controle e segurança da caldeira.

Todos os instrumentos e controles que interfiram com a segurança da caldeira deverão ser calibrados periodicamente e serem adequadamente mantidos.

A utilização de artifícios como por exemplo “jumps” que neutralizem os sistemas de controle e segurança será considerada como risco grave e iminente e pode levar à interdição da caldeira.

Utilizar “jumps” transitórios em situações onde existia redundância ou onde está sendo feita manutenção preventiva não será considerada como “artifício que neutralize” sistema de controle e segurança da caldeira.

Para esses casos, é necessário fazer estudo dos riscos envolvidos e acompanhamento desta operação, envolvendo todos os setores que possam por esta ser afetados.

A periodicidade de manutenção e a definição dos instrumentos e controles necessários à segurança da caldeira deverão ser definidos pelos profissionais legalmente habilitados para cada especialidade.

13.3.3 A qualidade da água deve ser controlada e tratamentos devem ser implementados, quando necessários, para compatibilizar suas propriedades físico-químicas com os parâmetros de operação da caldeira.

A qualidade da água é fator determinante da vida da caldeira. Estabelecer parâmetros de qualidade de água não faz parte do escopo desta NR uma vez que ela se aplica a variados tipos de caldeiras com diferentes pressões e temperaturas, instaladas em locais distintos.

Sempre que análises físico-químicas e resultados das inspeções indicarem problemas de depósitos excessivos, corrosão e outras deteriorações no lado água, atenção especial deverá ser dada à sua qualidade, em particular, verificando se suas características estão de acordo com as requeridas pela caldeira. De modo geral, quanto maior a pressão de operação mais apurados deverão ser os requisitos de tratamento de água.

13.3.4 Toda caldeira a vapor deve estar obrigatoriamente sob operação e controle de operador de caldeira, sendo que o não atendimento a esta exigência caracteriza condição de risco grave e iminente.

A responsabilidade pela existência de operadores de caldeiras adequadamente treinados é do dono do estabelecimento.

Uma caldeira pode estar sob controle simultâneo de vários operadores e, um operador poderá estar controlando simultaneamente mais de uma caldeira.

Entretanto, entende-se que “caldeiras sob controle de operador” é aquela onde existe, pelo menos 1 (um) operador, em condições de atuar prontamente para corrigir situações anormais que se apresentem.

13.3.5 Para efeito desta NR será considerado operador de caldeira aquele que satisfazer pelo menos uma das seguintes condições:

a) possuir certificado de “Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras” e comprovação de estágio prático conforme subitem 13.3.9;

b) Possuir certificado de “Treinamento de Segurança para Operação de Caldeiras” previsto na NR 13 aprovada pela portaria 02/84 de 08/05/94;

c) Possuir comprovação de pelo menos 3 (três) anos de experiência nessa atividade, até 8 de maio de 1984.

Para casos onde for necessária a comprovação de experiência na operação de caldeira deve-se considerar:

- anotação na carteira de trabalho, ou;
- prontuário ou atribuições fornecido pelo estabelecimento, ou;
- testemunho de pessoas;

Para cálculo dos três anos de experiência deverão ser descontados os tempo de interrupção.

A habilitação dos operadores de caldeira enquadrados nas alíneas b) e c) fica limitada ao tipo de caldeira que habitualmente vinham operando. Caso tenham necessidade de operar outros tipos de caldeira torna-se obrigatória a freqüência aos estágios práticos definidos no subitem 13.3.9.

13.3.6 O pré-requisito mínimo para participação, como aluno, no "Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras" é o 1º grau.

13.3.7 O "Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras" deve obrigatoriamente:

a) ser supervisionado tecnicamente por "Profissional Habilitado" citado no subitem 13.1.2;
b) ser ministrado por profissionais capacitados para esse fim;
c) obedecer, no mínimo, ao currículo proposto no Anexo I-A desta NR.

Poderão ser incluídos no treinamento outras matérias teóricas ou práticas que forem julgadas relevantes pelo supervisor técnico do treinamento.

13.3.8 Os responsáveis pela promoção do "Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras" estarão sujeitos ao impedimento de ministrar novos cursos, bem como a outras sanções legais cabíveis, no caso de inobservância do disposto subitem 13.3.7.

13.3.9 Todo operador de caldeira deve cumprir um estágio prático, na operação da própria caldeira que irá operar, o qual deverá ser supervisionado, documentado e ter duração mínima de:

a) Caldeiras categoria "A" : 80 (oitenta) horas;
b)Caldeiras categoria "B" : 60 (sessenta) horas;
c) Caldeiras categoria "C" : 40 (quarenta) horas.

A empresa ou estabelecimento deverá arquivar ou reunir os documentos que comprovem a participação de seus operadores no referido estágio.

Caso um operador, treinado de acordo com esta NR, necessite operar outra caldeira, deverá freqüentar estágio prático na nova caldeira que irá operar, mesmo que a nova caldeira seja da mesma categoria que a anterior.

No caso de instalações onde o operador deve operar caldeiras diferentes é exigido um estágio prático para cada caldeira. Ex.: Uma instalação com uma caldeira à óleo Categoria A e

uma caldeira elétrica Categoria C, serão necessárias 80 horas de estágio para a primeira e mais 40 horas de estágio para a segunda, totalizando 120 horas estágio.

O supervisor do estágio poderá ser por exemplo:

- chefe da Operação;
- operadores Chefe;
- engenheiro responsável pela planta;
- um operador mais experiente,
- “Profissional Habilitado”
- etc

13.3.10 O estabelecimento onde for realizado o estágio prático supervisionado, deve informar previamente à representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento:

a) período de realização do estágio;
b) entidade, empresa ou profissional responsável pelo “Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras;
c) relação dos participantes do estágio.

Ver observações do subitem 13.3.5.

13.3.11 A reciclagem de operadores deve ser permanente, por meio de constantes informações das condições físicas e operacionais dos equipamentos, atualização técnica, informações de segurança, participação em cursos, palestras e eventos pertinentes.

A necessidade e ocasião da reciclagem são de responsabilidade do empregador.

Para efeito de comprovação, deverá ser anexado à pasta funcional de cada operador o tipo de atividade, data de realização, duração etc.

13.3.12 Constitui condição de risco grave e iminente a operação de qualquer caldeira em condições diferentes das previstas no projeto original, sem que:

a) seja reprojetada levando em consideração todas as variáveis envolvidas na nova condição de operação;
b) sejam adotados todos os procedimentos de segurança decorrentes de sua nova classificação no que se refere a instalação, operação, manutenção e inspeção.

A operação de caldeiras em condições operacionais diferentes das previstas em seu projeto pode ser extremamente perigosa.

São exemplos de condições objeto deste item:

- pressões superiores às de operação;
- temperaturas de superaquecimento acima das de projeto;
- utilização de água ou outro fluido diferentes dos considerados no projeto;
- alteração do combustível ou dos queimadores.

Sempre que forem feitas modificações no projeto da caldeira ou de suas condições operacionais deverão ser adotados todos os procedimentos de segurança necessários.

As modificações efetuadas deverão sempre fazer parte da documentação da caldeira.

13.4 SEGURANÇA NA MANUTENÇÃO DE CALDEIRAS

13.4.1 Todos os reparos ou alterações em caldeiras devem respeitar o respectivo código de projeto de construção e as prescrições do fabricante no que se refere a:

a) materiais;
b) procedimentos de execução;
c) procedimentos de controle de qualidade;
d) qualificação e certificação de pessoal.

Os reparos e alterações citados neste item são extensivos aos periféricos da caldeira, tais como: chaminé, ventiladores, instrumentação etc.

No caso de tubulações a abrangência deste subitem limita-se ao trecho compreendido entre a caldeira e a solda ou flange mais próximo.

Deve ser considerado como **reparo** qualquer intervenção que vise corrigir não conformidades com relação ao projeto original. Por exemplo: reparos com soldas para recompor áreas danificadas, reparos em refratários e isolantes térmicos, substituição de conexões corroídas, etc.

Deve ser considerada como **alteração** qualquer intervenção que resulte em alterações no projeto original inclusive nos parâmetros operacionais da caldeira. Por exemplo: alterações na especificação de materiais, mudanças de combustível, mudanças na configuração nos tubos de troca térmica, inclusão de conexões etc.

São exemplos de qualificação e certificação de pessoal os procedimentos previstos pelo código ASME Seção IX (Qualificação de Soldagem e Brasagem) e Seção V (Ensaios Não Destrutivos).

13.4.1.1 Quando não for conhecido o código de projeto de construção, deve ser respeitada a concepção original da caldeira, com procedimento de controle do maior rigor prescrito nos códigos pertinentes.

Caso a documentação da caldeira tenha se extraviado e não seja possível localizar o fabricante, os reparos e alterações deverão respeitar a concepção original. Nestas ocasiões de reparos e alterações o "Profissional Habilitado" deverá propor testes e ensaios, bem como critérios de aceitação compatíveis com os mais rigorosos dos códigos de projeto reconhecidos internacionalmente.

13.4.1.2 Nas caldeiras de categorias "A" e "B", a critério do "Profissional Habilitado", citado no subitem 13.1.2, podem ser utilizadas tecnologias de cálculo ou procedimentos mais avançados, em substituição aos previstos pelo código de projeto.

Para caldeiras de categoria "A" e "B", em casos particulares, e desde que embasado pelo "Profissional Habilitado", poderão ser utilizados procedimentos de cálculo e tecnologia não previstas pelo código de projeto. São exemplos destes procedimentos: técnicas de mecânica da fratura que permitam a convivência com descontinuidades subcríticas, técnicas alternativas de soldagem que dispensem o alívio de tensão, etc.

13.4.2 "Projetos de Alteração ou Reparo" devem ser concebidos previamente nas seguintes situações:

a) sempre que as condições de projeto forem modificadas,
b) sempre que forem realizados reparos que possam comprometer a segurança.

Antes da execução de qualquer reparo ou alteração que possam comprometer a segurança da caldeira ou dos trabalhadores, deverá ser elaborado o respectivo "Projeto de Alteração ou Reparo" que passará a fazer parte da documentação da caldeira.

Não é necessário enviar este documento para apreciação de órgão externos à empresa, tais como: DRT, sindicato etc.

São exemplos de "Projetos de Alteração e Reparo": Alteração de materiais, disposição de tubos, configuração de maçaricos, inclusão de conexões, reparos com solda, limpeza química etc.

13.4.3 O “Projeto de Alteração ou Reparo” deve:

a) ser concebido ou aprovado por “Profissional Habilitado”, citado no subitem 13.1.2,
b) determinar materiais, procedimentos de execução, controle de qualidade e qualificação de pessoal.

O Projeto de Alteração e Reparo pode ser concebido por firma especializada desde que a mesma esteja registrada no CREA e disponha de um responsável técnico legalmente habilitado.

Reparos ou alterações que envolvam as especialidades de eletricidade, eletrônica ou química deverão ser concebidos e assinados por profissionais habilitados para cada campo especifico. Independente desta necessidade, todo “Projeto de alteração e Reparo” deverá ser assinado por “Profissional Habilitado”.

13.4.4 Todas as intervenções que exijam mandrilamento ou soldagem em partes que operem sob pressão devem ser seguidas de teste hidrostático, com características definidas pelo “Profissional Habilitado”, citado no subitem 13.1.2.

Quando não definidos em normas ou códigos caberá ao “Profissional Habilitado”, em função de sua experiência e conhecimento definir os parâmetros envolvidos no teste hidrostático. Nestes parâmetros deverão constar:

- fluido a ser utilizado para pressurização;
- taxa de subida da pressão e patamares quando necessário;
- pressão final de teste hidrostático;
- tempo em que o equipamento ficará pressurizado.

As características e resultados do teste hidrostático deverão constar do “Relatório de Inspeção de Segurança” que compreende o teste, seja ele inicial, periódica ou extraordinária.

13.4.5 Os sistemas de controle e segurança da caldeira devem ser submetidos a manutenção preventiva ou preditiva.

A definição dos instrumentos e sistemas de controle a serem incluídos no plano de manutenção preditiva/preventiva, bem como a respectiva periodicidade, deverá ser atribuída a profissionais com competência legal para executar este tipo de atividade.

A “Manutenção Preventiva” consiste na realização de tarefas de assistência que tiverem sido pré-planejadas para execução em pontos específicos, a tempo de manter as capacidades funcionais de sistema de controle e segurança de caldeira.

Quando a “Manutenção Preventiva” tiver suas datas de intervenção baseadas no acompanhamento da evolução de parâmetros ligados ao sistema (por exemplo temperatura, vibração, viscosidade de óleo) passa a ser denominada de “Preditiva”.

Quando a “Manutenção Preventiva” tiver suas datas de intervenção baseadas no histórico de vida útil dos componentes ligados ao sistema recebe a denominação de “Preventiva”.

13.5 INSPEÇÃO DE SEGURANÇA DE CALDEIRAS

13.5.1 As caldeiras devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária sendo considerado condição de risco grave e iminente o não atendimento aos prazos estabelecidos nesta NR.

13.5.2 A inspeção de segurança inicial deve ser feita em caldeiras novas, antes da entrada em funcionamento, no local de operação, devendo compreender exame interno e externo, teste hidrostático e de acumulação.

Exames internos, externos e teste hidrostático, efetuados nas dependências do fabricante da caldeira são importantes e necessários, porém não constituem a “Inspeção de Segurança Inicial” uma vez que, os componentes da caldeira podem sofrer avarias durante seu transporte, armazenamento e montagem no local definitivo. A inspeção de segurança só poderá portanto ser realizada quando a caldeira já estiver instalada em seu local definitivo.

O teste de acumulação deve ser executado em conformidade com normas técnicas vigentes, recomendações dos fabricantes da caldeira e dos fabricantes de válvulas de segurança ou ainda em conformidade com procedimentos estabelecidos por “Profissional Habilitado”.

13.5.3 A inspeção de segurança periódica, constituída por exame interno e externo, deve ser executada nos seguintes prazos máximos:

a) 12 (doze) meses para caldeiras das categorias “A”, “B” e “C”;
b) 12 (doze) meses para caldeiras de recuperação de álcalis de qualquer categoria;
c) 24 (vinte e quatro) meses para caldeiras da categoria “A”, desde que aos 12 (doze) meses sejam testadas as pressões de abertura das válvulas de segurança;
d) 40 (quarenta) meses para caldeiras especiais conforme definido no item 13.5.5.

A abrangência da inspeção de segurança periódica bem como as técnicas a serem utilizadas deverão ser definidas pelo “Profissional Habilitado” em função do histórico da caldeira e das Normas técnicas vigentes.

Os prazos definidos nesse item devem ser considerados como máximos. O prazo real deverá ser estabelecido pelo “Profissional Habilitado” em função da experiência anterior disponível, devendo ser contados a partir da última inspeção completa executada na caldeira.

Não faz parte do escopo desta NR detalhar métodos ou procedimentos de inspeção. Esta ação deverá ser feita pelo “Profissional Habilitado” com base em códigos e normas internacionalmente reconhecidos.

Os prazos estabelecidos nas alíneas a), b) e c) são aplicáveis em empresas que não possuam “Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos”

13.5.4 Estabelecimentos que possuam “Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos”, conforme estabelecido no Anexo II, podem estender os períodos entre inspeções de segurança respeitando os seguintes prazos máximos:

a) 18 (dezoito) meses para caldeiras das categorias “B” e “C”;

b) 30 (trinta) meses para caldeiras da categoria “A”.

A extensão do prazo de inspeção das caldeiras da categoria “A” para 30 meses não dispensa a execução dos testes para determinação da pressão de abertura das válvulas de segurança a cada 12 meses.

O teste para determinação da pressão da abertura das válvulas de segurança poderá ser executado com a caldeira em operação valendo-se de dispositivos hidráulicos apropriados. O procedimento escrito adotado no teste, os resultados obtidos e os certificados de aferição do dispositivo deverão ser anexados à documentação da caldeira.

Este item também é aplicável a caldeiras de recuperação de álcalis instaladas em estabelecimentos que possuam “Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos”.

13.5.5 As caldeiras que operam de forma contínua e que utilizam gases ou resíduos das unidades de processo, como combustível principal para aproveitamento de calor ou para fins de controle ambiental, podem ser consideradas especiais quando todas as condições seguintes forem satisfeitas:

a) estiverem instaladas em estabelecimentos que possuam “Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos” citado no Anexo II;

b) tenham testados a cada 12 (doze) meses o sistema de intertravamento e a pressão de abertura de cada válvula de segurança;

c) não apresentem variações inesperadas na temperatura de saída dos gases e do vapor, durante a operação;

d) exista análise e controle periódico da qualidade da água;

e) exista controle de deterioração dos materiais que compõem as principais partes da caldeira;

f) seja homologada como classe especial mediante:

- acordo entre a representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento e o empregador;

- intermediação do órgão regional do MTb, solicitada por qualquer uma das partes, quando não houver acordo;

- decisão do órgão regional do MTb quando, persistir o impasse.

13.5.6 Ao completar 25 (vinte e cinco) anos de uso, na sua inspeção subseqüente, as caldeiras devem ser submetidas a rigorosa avaliação de integridade para determinar a sua vida remanescente e novos prazos máximos para inspeção, caso ainda estejam em condições de uso.

A avaliação de vida residual presume que seja analisada a integridade de cada componente fundamental da caldeira (Ex.: Tubulão, tubos de troca térmica, espelhos, etc).

A avaliação de integridade e vida residual pode ser executada por “Profissional Habilitado” ou por empresa especializada, inscrita no CREA, e que disponha de pelo menos um “Profissional Habilitado”.

Caso a caldeira já tenha sido submetida a testes, exames e análises para estabelecimento da vida residual e avaliação de integridade antes de completar 25 anos, estes dados poderão ser considerados, a critério do “Profissional Habilitado”, para atender parcial ou integralmente as exigências deste subitem.

É importante ressaltar que caldeiras inoperantes podem sofrer significativos desgastes por corrosão. Portanto, dos 25 anos considerados neste subitem, não devem ser dispensados sem profunda análise técnica os períodos em que a caldeira permanecer fora de operação.

O quadro a seguir resume os prazos máximos estabelecidos para inspeção de caldeiras.

	Categoria "A"	Categoria "B" e "C"	Especial
Estabelecimento **sem** Serviço Próprio de Inspeção de Equipamento	12 meses ou 24 meses com testes de válvulas de segurança a cada 12 meses (exceto caldeira de recuperação de Álcalis)	12 meses	
Estabelecimento **com** Serviço Próprio de Inspeção de Equipamento	30 meses	18 meses	40 meses

13.5.6.1 Nos estabelecimentos que possuam "Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos" citado no Anexo II, o limite de 25 (vinte e cinco) anos pode ser alterado em função do acompanhamento das condições da caldeira, efetuado pelo referido órgão.

13.5.7 As válvulas de segurança instaladas em caldeiras devem ser inspecionadas periodicamente conforme segue:

a) pelo menos uma vez por mês, mediante acionamento manual da alavanca, em operação, para caldeiras das categorias "B" e "C".

b) desmontando, inspecionando e testando, em bancada, as válvulas flangeadas e, no campo, as válvulas soldadas, recalibrando-as numa frequência compatível com a experiência operacional da mesma, porém respeitando-se como limite máximo o período de inspeção estabelecido no subitem 13.5.3 ou 13.5.4, se aplicável, para caldeiras de categorias "A" e "B".

A alínea a) deste subitem determina o acionamento manual da alavanca e portanto torna obrigatória a existência de alavanca em válvulas de segurança instaladas em caldeiras de categorias "B" e "C".

As exigências deste subitem tem fundamentação técnica no código ASME Seção I (Caldeiras) e na Norma ANSI/NB-23, National Board Inspection Code, reconhecidos internacionalmente.

13.5.8 Adicionalmente aos testes prescritos no subitem 13.5.7 as válvulas de segurança instaladas em caldeiras deverão ser submetidas a testes de acumulação, nas seguintes oportunidades:

a) na inspeção inicial da caldeira;

b)quando forem modificadas ou tiverem sofrido reformas significativas;

c) quando houver modificação nos parâmetros operacionais da caldeira ou variação na PMTA;

d) quando houver modificação na sua tubulação de admissão ou descarga.

Em função dos riscos envolvidos com a execução dos testes de acumulação o estabelecimento deverá implementar todas as medidas de segurança e preservação do meio ambiente necessárias.

A alínea b) refere-se à modificações ou reparos efetuados nas válvulas de segurança da caldeira.

Teste de Acumulação

O teste de acumulação é feito para verificar se a válvula ou válvulas de segurança instaladas em caldeiras tem capacidade de descarregar todo o vapor gerado, na máxima taxa de queima, sem permitir que a pressão interna suba para valores acima dos valores considerados no projeto (no caso de caldeiras projetadas pelo ASME Seção I este valor corresponde a 6% acima da PMTA).

Este teste deve ser executado com base em procedimentos estabelecidos pelo fabricante da caldeira e/ou do fabricante das válvulas de segurança.

Como este teste é executado com todas as saídas de vapor bloqueadas, a falta de circulação poderá provocar danos em caldeiras providas de super aquecedores ou em caldeiras para aquecimento de água, não sendo portanto recomendável sua execução em caldeiras desta configuração.

13.5.9 A inspeção de segurança extraordinária deve ser feita nas seguintes oportunidades:

a) sempre que a caldeira for danificada por acidente ou outra ocorrência capaz de comprometer sua segurança;

b) quando a caldeira for submetida a alteração ou reparo importante capaz de alterar suas condições de segurança;

c) antes da caldeira ser recolocada em funcionamento, quando permanecer inativa por mais de 6 (seis) meses;

d) quando houver mudança de local de instalação da caldeira.

A inspeção de segurança extraordinária pode abranger toda a caldeira ou parte da mesma conforme a necessidade e a critério do “Profissional Habilitado”.

No caso de uma caldeira que permanecer fora de operação por um período longo (superior a 6 meses), a inspeção extraordinária mencionada na alínea “c” deve ser realizada antes da caldeira ser recolocada em funcionamento e não a cada 6 meses.

13.5.10 A inspeção de segurança deve ser realizada por “Profissional Habilitado”, citado no subitem 13.1.2, ou por “Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos”, citado no anexo II.

O subitem refere-se a todos os tipos de inspeção de segurança, inicial, periódica ou extraordinária.

O “Profissional Habilitado” pode contar com a participação de inspetores e/ou técnicos de inspeção nas inspeções de segurança.

Firmas especializadas podem ser utilizadas desde que sejam inscritas no CREA e possuam “Profissionais Habilitados”.

13.5.11 Inspecionada a caldeira, deve ser emitido “Relatório de Inspeção”, que passa a fazer a parte da sua documentação.

13.5.12 Uma cópia do “Relatório de Inspeção” deve ser encaminhada pelo “Profissional Habilitado”, citado no subitem 13.1.2, num prazo máximo de 30 (trinta) dias a contar do término da inspeção, à representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento.

Este subitem obriga o envio de Relatório de Inspeção somente à representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento.

13.5.13 O “Relatório de Inspeção”, mencionado no subitem 13.5.11, deve conter no mínimo:

a) dados constantes na placa de identificação da caldeira;
b) categoria da caldeira;
c) tipo da caldeira;
d) tipo de inspeção executada;
e) data de início e término da inspeção;
f) descrição das inspeções e testes executados;
g) resultado das inspeções e providências;
h) relação dos itens desta NR ou de outras exigências legais que não estão sendo atendidas;
i) conclusões;
j) recomendações e providências necessárias;
k) data prevista para a nova inspeção da caldeira;
l) nome legível, assinatura e número do registro no conselho do "Profissional Habilitado", citado no subitem 13.1.2, e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção.

Entende-se por "tipo de caldeira" a informação se a caldeira é a aquotubular, flamotubular, elétrica etc.

São exemplos de itens da alínea h):

- ausência de manômetros,
- ausência de válvulas de segurança,
- distanciamento incorreto entre a caldeira e reservatório de partida,
- cores em desacordo com a NR-26.

Um exemplo da alínea i) conclusões, seria:

"Face as inspeções executadas, a caldeira poderá ser recolocada em operação, respeitando-se os parâmetros operacionais estabelecidos pelo projeto, devendo ser submetida a nova inspeção de segurança periódica em __/__/__".

A alínea j) deverá listar as recomendações a serem seguidas a partir da inspeção executada, como por exemplo:

- melhorar o tratamento de água;
- testar a válvula de segurança no prazo de 3 meses;
- adequar a cor das escadas e plataformas.

13.5.14 Sempre que os resultados da inspeção determinarem alterações dos dados da placa de identificação, a mesma deve ser atualizada.

ANEXO I-A

CURRÍCULO MÍNIMO PARA "TREINAMENTO DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO DE CALDEIRAS"

1. NOÇÕES DE GRANDEZAS FÍSICAS E UNIDADES
Carga horária: 04 horas

1.1. Pressão

1.1.1. Pressão atmosférica
1.1.2. Pressão interna de um vaso
1.1.3. Pressão manométrica, pressão relativa e pressão absoluta
1.1.4. Unidades de pressão

1.2. Calor e Temperatura

1.2.1. Noções gerais: o que é calor, o que é temperatura
1.2.2. Modos de transferência de calor
1.2.3. Calor específico e calor sensível
1.2.4. Transferência de calor a temperatura constante
1.2.5. Vapor saturado e vapor superaquecido
1.2.6. Tabela de vapor saturado

2. CALDEIRAS - CONDIÇÕES GERAIS
Carga horária: 08 horas

2.1. Tipos de caldeiras e suas utilizações

2.2. Partes de uma caldeira

2.2.1. Caldeiras flamotubulares
2.2.2. Caldeiras aquotubulares
2.2.3. Caldeiras elétricas
2.2.4. Caldeiras a combustíveis sólidos
2.2.5. Caldeiras a combustíveis líquidos
2.2.6. Caldeiras a gás
2.2.7. Queimadores

2.3. Instrumentos e dispositivos de controle de caldeira

2.3.1. Dispositivo de alimentação
2.3.2. Visor de nível
2.3.3. Sistema de controle de nível
2.3.4. Indicadores de pressão
2.3.5. Dispositivos de segurança
2.3.6. Dispositivos auxiliares

2.3.7. Válvulas e tubulações
2.3.8. Tiragem de fumaça

3. OPERAÇÃO DE CALDEIRAS
Carga horária: 12 horas

3.1. Partida e parada

3.2. Regulagem e controle;

3.2.1. de temperatura
3.2.2. de pressão
3.2.3. de fornecimento de energia
3.2.4. do nível de água
3.2.5. de poluentes

3.3. Falhas de operação, causas e providências

3.4. Roteiro de vistoria diária

3.5. Operação de um sistema de várias caldeiras

3.6. Procedimentos em situações de emergência

4. TRATAMENTO DE ÁGUA E MANUTENÇÃO DE CALDEIRAS
Carga horária: 08 horas

4.1. Impurezas da água e suas consequências

4.2. Tratamento de água

4.3. Manutenção de caldeiras

5. PREVENÇÃO CONTRA EXPLOSÕES E OUTROS RISCOS
Carga horária: 04 horas

5.1. Riscos gerais de acidentes e riscos à saúde

5.2. Riscos de explosão

6. LEGISLAÇÃO E NORMALIZAÇÃO
Carga horária: 04 horas

6.1. Normas Regulamentadoras

6.2. Norma Regulamentadora 13 (NR-13)

O currículo apresentado é mínimo, podendo ser acrescido de outras disciplinas, ou ter a carga horária das disciplinas estendidas em função das particularidades de cada estabelecimento.

O currículo proposto é aplicável ao treinamento de operadores a partir do ano de 1995.

Considera-se que os cursos de formação de operadores existentes nas empresas, que contemplem totalmente as disciplinas e carga horária previstas neste anexo, podem ser equivalente ao "Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras" desde que seja emitido o certificado previsto no subitem 13.3.5 alínea a).

ANEXO II

REQUISITOS PARA CERTIFICAÇÃO DE "SERVIÇO PRÓPRIO DE INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS"

Antes de colocar em prática os períodos especiais entre inspeções, estabelecidos nos subitens 13.5.4. e 13.10.3. desta NR, os "Serviços Próprios de Inspeção de Equipamentos" da empresa, organizados na forma de setor, seção, departamento, divisão ou equivalente, devem ser certificados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) diretamente ou mediante "Organismo de Certificação" por ele credenciados, que verificarão o atendimento aos seguintes requisitos mínimos expressos nas alíneas "a" a "g". Esta certificação pode ser cancelada sempre que for constatado o não atendimento a qualquer destes requisitos

a) existência de pessoal próprio da empresa onde estão instalados caldeira ou vaso de pressão, com dedicação exclusiva a atividades de inspeção, avaliação de integridade e vida residual, com formação, qualificação e treinamento compatíveis com a atividade proposta de preservação da segurança;

b) mão-de-obra contratada para ensaios não-destrutivos certificada segundo regulamentação vigente e para outros serviços de caráter eventual, selecionada e avaliada segundo critérios semelhantes ao utilizado para a mão-de-obra própria;

c) serviço de inspeção de equipamentos proposto possuir um responsável pelo seu gerenciamento formalmente designado para esta função;

d) existência de pelo menos um "Profissional Habilitado", conforme definido no subitem 13.1.2;

e) existência de condições para manutenção de arquivo técnico atualizado, necessário ao atendimento desta NR, assim como mecanismos para distribuição de informações quando requeridas;

f) existência do procedimentos escritos para as principais atividades executadas;

g) existência de aparelhagem condizente com a execução das atividades propostas;

O assunto é objeto de documentação complementar expedida pelo INMETRO.

Para o caso específico de “Plataformas de produção e exploração de Petróleo” e navios o serviço próprio de inspeção de equipamentos poderá ser instalado “em terra”.

ANEXO III

1 - Esta NR deve ser aplicada aos seguintes equipamentos:

a) qualquer vaso cujo produto “P.V” seja superior a 8 (oito) onde “P” é a máxima pressão de operação em kPa e “V” o seu volume geométrico interno em m^3, incluindo:

permutadores de calor, evaporadores e similares;
vasos de pressão ou partes sujeitas a chama direta que não estejam dentro do escopo de outras NRs, nem do item 13.1 desta NR;
vasos de pressão encamisados, incluindo refervedores e reatores;
autoclaves e caldeiras de fluido térmico que não o vaporizem.

b) vasos que contenham fluido de classe “A”, especificados no Anexo IV, independentes das dimensões e do produto “P.V”.

2- Esta NR não se aplica aos seguintes equipamentos:

a) cilindros transportáveis, vasos destinados ao transporte de produtos, reservatórios portáteis de fluido comprimido e extintores de incêndio;

b) os destinados à ocupação humana;

c) câmara de combustão ou vasos que façam parte integrante de máquinas rotativas ou alternativas, tais como bombas, compressores, turbinas, geradores, motores, cilindros pneumáticos e hidráulicos e que não possam ser caracterizados como equipamentos independentes;

d) dutos e tubulações para condução de fluido;

e) serpentinas para troca térmica;

f) tanques e recipientes para armazenamento e estocagem de fluidos não enquadrados em normas e códigos de projeto relativos a vasos de pressão;

g) vasos com diâmetro interno inferior a 150 (cento e cinqüenta) mm para fluidos da classe “B”, “C” e “D”, conforme especificado no Anexo IV.

ANEXO IV

CLASSIFICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO

1- Para efeito desta NR os vasos de pressão são classificados em categorias segundo o tipo de fluido e o potencial de risco.

1.1- Os fluidos contidos nos vasos de pressão são classificados conforme descrito a seguir:

CLASSE “A”
Fluidos inflamáveis;
Combustível com temperatura superior ou igual a 200ºC;
Fluidos tóxicos com limite de tolerância igual ou inferior a 20 ppm;
Hidrogênio;
Acetileno.

CLASSE “B”
Fluidos combustíveis com temperatura inferior a 200ºC;
Fluidos tóxicos com limite de tolerância superior a 20 ppm.

CLASSE “C”
Vapor de água, gases asfixiantes simples ou ar-comprimido.

CLASSE “D”
Água ou outros fluidos não enquadrados nas classes “A”, “B” ou “C”, com temperatura superior a 50ºC.

1.1.1 Quando se tratar de mistura, deverá ser considerado para fins de classificação o fluído que apresentar maior risco aos trabalhadores a instalações considerando-se sua toxicidade, inflamabilidade e concentração.

1.2 - Os vasos de pressão são classificados em grupos de potencial de risco em função do produto “P.V”, onde “P” é a pressão máxima de operação em MPa e “V” o seu volume geométrico interno em m^3, conforme segue:

GRUPO 1 - P.V ≥ 100

GRUPO 2 - P.V < 100 e P.V ≥ 30

GRUPO 3 - P.V < 30 e P.V ≥ 2,5

GRUPO 4 - P.V < 2,5 a P.V ≥ 1

GRUPO 5 - P.V < 1

1.2.1 Vasos de pressão que operem sob a condição de vácuo deverão enquadrar-se nas seguintes categorias:

Categoria I - para fluidos inflamáveis ou combustíveis;

Categoria V - para outros fluidos

1.3 - A tabela a seguir classifica os vasos de pressão em categorias de acordo com os grupos de potencial de risco e a classe de fluido contido.

Categorias de Vasos de Pressão

CLASSE DE FLUIDO	GRUPO DE POTENCIA DE RISCO				
	1 P.V ≥ 100	2 P.V < 100 P.V ≥ 30	3 P.V < 30 P.V ≥ 2,5	4 P.V < 2,5 P.V ≥ 1	5 P.V < 1
"A" - líquidos inflamáveis - combustível com temperatura ≥ 200ºC - tóxico com limite de tolerância ≤ 20 ppm - Hidrogênio - Acetileno	I	I	II	III	III
"B" - combustível com temperatura < 200ºC - tóxico com limite de tolerância > 20 ppm	I	II	III	IV	IV
"C" - vapor de água - gases asfixiantes - ar comprimido	I	II	III	IV	V
"D" - água ou outros fluidos não enquadrados nas classes "A", "B" ou "C", com temperatura superior a 50ºC	II	III	IV	V	V

Notas:

a) Considerar Volume em m^3 e Pressão em MPa.

b) Considerar 1 MPa correspondendo à 10,197 Kgf/cm^2.

Prazos para Enquadramento das Empresas a NR-13

Em reunião executada em Brasília no dia 18 de novembro de 1994, o GRUPO DE TRABALHO PARA REVISÃO DA NR-13 estabeleceu os seguintes prazos para adequação das empreses aos requisitos de norma em referência:

CALDEIRAS

ITEM 13.1.4 Adequação de manômetros, válvulas de segurança, sistemas de controle de nível etc.
180 dias

ITEM 13.1.5 Adequação de placas de identificação e pintura ou colocação de placas adicionais.
90 dias

ITEM 13.1.6 Adequação do prontuário da caldeira e documentação complementar.
120 dias

ITEM 13.1.9 Classificação das caldeiras em função de volume e pressão.
90 dias

ITEM 13.2 Adequação das instalações aos requisitos mínimos da norma.
180 dias

ITEM 13.3.1 Adequação dos manuais de operação.
180 dias

ITENS 13.3.4 A 13.3.10 Adequação do treinamento de novos operadores.
90 dias

ITEM 13.4.5 Implantação de plano de manutenção preventiva em sistemas de controle de segurança.
90 dias

ITEM 13.5 Os prazos para inspeção de segurança das caldeiras devem ser adequados de imediato, considerado-se para início de contagem a data da Última inspeção periódica/extraordinária.

DEMAIS ITENS RELATIVOS A **CALDEIRAS** DEVEM SER ADEQUADOS IMEDIATAMENTE APÓS A PUBLICAÇÃO DA PORTARIA.

VASOS DE PRESSÃO

ITEM 13.6.1 Classificação dos vasos de pressão.
120 dias

ITEM 13.6.2 Adequação de manômetros, válvulas de segurança etc.
270 dias

ITENS 13.6.3 e 13.6.3.1 Adequação das placas de identificação e pintura ou instalação de placa suplementar com a categoria.
180 dias

ITEM 13.6.4.a Adequação da documentação.
180 dias

ITEM 13.6.4.c Elaboração do projeto de instalação.
180 dias

ITEM 13.7 Adequação das instalag6es.
180 dias

ITEM 13.8.1 Adequação dos manuais de operação.
180 dias

ITEM 13.8.3 Treinamento de operadores novos.
180 dias

ITEM 13.9.6 Implantação de plano de manutenção preventiva de sistemas de controle e segurança.
120 dias

ITEM 13.10 Os prazos para inspeção de segurança devem ser adequados de imediato, considerando-se para início de contagem a data da ú1tima inspeção periódica ou teste hidrostático.

DEMAIS ITENS RELATIVOS A **VASOS DE PRESSÃO** DEVEM SER ADEQUADOS IMEDIATAMENTE APÓS A PUBLICAÇÃO DA PORTARIA.

Parte 4 - Características e Tratamento da Água

Autor
Allan Sven Sarev
Engenheiro

Compilação
Luiz Carlos Martinelli Jr.
Professor UNIJUÍ - Campus Panambi

A impressão e utilização deste foi possibilitada pela parceria entre a ARGAL Química Ind. e Com. Ltda. e a UNIJUÍ, em seu Curso de Engenharia Mecânica.

A ARGAL[2], fundada em 1960, é uma empresa que atua principalmente nos setores de produtos químicos e serviços voltados para tratamento de águas industriais, vernizes gráficos e especialidades químicas.

Possui sede própria instalada em São Caetano do Sul, SP, onde conta com prédio administrativo, laboratórios, centro de pesquisas e unidades industriais e, em São Bernardo do Campo, SP, possui ainda o CRT - Centro de Treinamento e Recreação.

O Curso de Engenharia Mecânica da UNIJUÍ[3], criado em 1992, dentro de uma filosofia de trabalho, procura fornecer aos seus acadêmicos informações tecnológicas dentro de um contexto atual, moderno.

Situado em Panambi, RS, o Curso procura uma integração entre Teoria e Prática, estreitando relacionamentos com empresas de ponta. Parcerias com empresas tecnologicamente avançadas facilitam a troca de informações, gerando dúvidas, questões, pesquisas e, como conseqüência, conhecimento.

---

[2] ARGAL Química Ind. e Com. Ltda.
Rua Major Carlo Del Prete, 1596/1608 - São Caetano do Sul - SP

[3] UNIJUÍ - Campus Panambi
Av. Prefeito Rudi Franke, 540 - Caixa Postal 121
Fone/Fax: (55) 3375 - 4466
e-mail: martinel@unijui.tche.br

Introdução

Propósito da Apostila

O presente trabalho é um guia orientativo dirigido a profissionais ligados ao setor de Tratamento de Águas Industriais.

Neste trabalho, procuramos demonstrar os problemas mais comuns que ocorrem e interferem no funcionamento normal de sistemas geradores de vapor e seus circuitos de água. Partindo deste ponto, abordamos as causas e mecanismos que os originam, bem como, seus efeitos sobre tais sistemas.

Após uma introdução detalhamos alguns métodos adequados de controle que visam eliminar tais inconvenientes proporcionando um tempo de utilização mais longo dos equipamentos.

Sistemas Geradores de Vapor

1. Definição e Finalidade

Entende-se por sistema gerador de vapor (caldeira), o conjunto de equipamentos, tubulações e acessórios destinados a produção de vapor saturado ou superaquecido a diversas pressões de trabalho, utilizando-se da energia térmica.

2. Tipos

Basicamente, existem dois tipos de caldeiras, a saber:

* Flamotubular ou Fogotubular: nas quais o fogo e os gases de combustão passam internamente pelos tubos banhados pela água.

* Aquatubular ou Parede D'água: nas quais a água passa internamente pelos tubos envolvidos pelas chamas e gases de combustão.

Conforme a pressão de trabalho e a produção de vapor requerido, pode-se classificar as caldeiras em:

- caldeiras de baixa pressão: geralmente são caldeiras flamotubulares e têm baixa produção de vapor;
- caldeiras de média pressão: podem ser tanto caldeiras flamotubulares como aquatubulares;
- caldeiras de alta pressão: geralmente são caldeiras aquatubulares e têm alta produção de vapor.

3. Esquema genérico de um Gerador de Vapor

Usualmente, classificam-se os sistemas geradores de vapor em três setores distintos, que compreendem:

- seção pré-caldeira: esta seção inclui todos os equipamentos e tubulações destinados ao acondicionamento da água antes da sua entrada na caldeira.
- caldeira: esta seção é a responsável, propriamente dita, pela geração de vapor pelo sistema.
- seção pós-caldeira: esta seção inclui todos os equipamentos e tubulações após a caldeira, com exceção do aquecedor-desaerador.

A figura 1 abaixo, ilustra um sistema típico de geração de vapor:

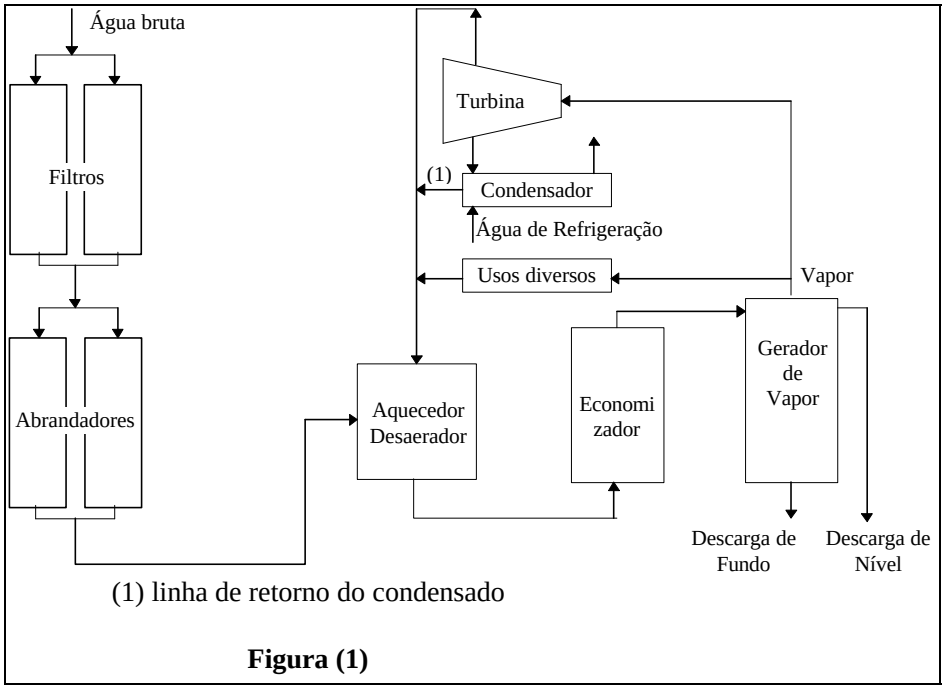


Figura (1)

I - ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO

1. Fontes de Captação

A qualidade da água para utilização industrial, depende da finalidade a que se destina. Para a alimentação de caldeiras, impõe-se a escolha de uma água cujas características sejam compatíveis com as especificações do equipamento; para tanto, um dos requisitos necessários é o uso de uma água sempre de maior pureza, quanto maior for a pressão de trabalho de uma caldeira.

Inúmeros mananciais podem ser utilizados como fonte de captação da água destinada a alimentação em sistemas geradores de vapor, tais como: águas superficiais de rios, lagos e represas; águas de poços artesianos, águas da rede pública, etc.

2. Características das Águas

2.1 - Contaminantes

Geralmente as águas naturais captadas nos mananciais possuem uma série de contaminantes, cuja composição e proporção estão relacionadas com a constituição geológica dos terrenos atravessados nas proximidades de centros industrializados, além das variações climáticas no decorrer do ano.

Os contaminantes podem ser classificados em três tipos principais:

- sólidos dissolvidos, dos quais destacamos os sais de Ca^{2+} , Mg^{2+}, Fe^{2+}, sílica, bicarbonatos, carbonatos, cloretos e sulfatos.

- sólidos em suspensão: geralmente constituídos de materiais particulados, responsáveis pela turbidêz da água.

- gases dissolvidos, entre os principais gases encontrados têm-se o oxigênio e o gás carbônico e menos freqüentemente a presença de amônia, gás sulfídrico e cloro.

A maioria das águas de superfícies (lagos, rios e represas), comumente apresentam substâncias orgânicas solúveis provenientes da decomposição de vegetais, resíduos domésticos e industriais e geralmente, não são caracterizados pelo teor de sais minerais dissolvidos, ao contrário das águas de origem subterrânea (poços, fontes).

A Tabela 1, a seguir, mostra os principais constituintes e suas concentrações médias encontradas em diversas fontes.

Tabela 1 - Principais constituintes e suas concentrações médias encontradas em diversas fontes

Constituintes	Poço São Caetano do Sul - SP	Rio Tietê - Barra Bonita - SP	Represa Juiz de Fora - MG	Rede Pública São Caetano do Sul - SP
pH	7,5	6,8	6,5	7,9
dureza total (como $CaCO_3$)	65	8	16	32
cálcio (como Ca^{2+})	18,6	3,2	4,3	9,6
magnésio (como Mg^{2+})	3,8	0,14	0,22	0,85
ferro (como Fe^{3+})	21,1	3,60	3,2	1
sílica (como SiO_2)	55	10	2	8
carbonatos (como CO_3^{2-})	0,0	0,92	0,0	0,0
bicarbonatos (como HCO_3^-)	145	24,4	16	98
sulfatos (como SO_4^{2-})	10,3	0,0	0,0	2
cloretos (como CL^-)	7	1,4	2,8	17
sólidos totais dissolvidos	210	28	40	120
turbidêz (ppm de SiO_2)	4	45	6	4,5
dióxido de carbono livre	6	8	12	6

2.2 - Constituintes

Classifica-se a água segundo os constituintes nela presentes, caracterizando-as conforme os teores de:

- dureza
- alcalinidade
- salinidade
- sílica
- turbidêz
- gases dissolvidos

DUREZA

A dureza de uma água varia de acordo com o número total de átomos de cálcio e magnésio que ela contém.

Embora exista uma unidade internacional (MEQ) miliequivalente, para exprimir a dureza, diversos países industrializados utilizam-se de medidas diferentes. No Brasil costuma-se exprimir a dureza em ppm (partes por milhão).

A Tabela 2, estabelece a correspondência entre estas diferentes unidades.

Tabela 2 - Conversão de Graus de Dureza						
	miliequivalente	Grau Francês	Grau Inglês	Grau Americano	Grau Alemão	ppm $CaCO_3$
1 miliequival.	1,000	5,00	3,50	2,900	2,800	50,0
1º francês	0,200	1,00	0,70	0,580	0,560	10,0
1º inglês	0,286	1,43	1,00	0,830	0,800	14,3
1º americano	0,340	1,72	1,20	1,000	0,960	17,2
1º alemão	0,358	1,79	1,25	1,040	1,000	17,9
1 ppm $CaCO_3$	0,020	0,10	0,07	0,058	0,056	1,0

Deve-se distinguir:

- a dureza total: que é a medida indicativa da quantidade total de sais de cálcio e magnésio.
- a dureza de não carbonatos ou permanente: atribuída à presença de sais de magnésio, cloretos e sulfatos.
- a dureza temporária: essencialmente devida aos bicarbonatos e carbonatos. A dureza temporária é igual a diferença entre a dureza total e a dureza permanente.

ALCALINIDADE

A alcalinidade da água se deve à presença de compostos alcalinos. O controle da mesma é importante para se evitar a corrosão do ferro pela água. A medida do pH de uma água permite avaliar qualitativamente grau de alcalinidade da mesma. O controle adequado do pH da água ou da alcalinidade, evita as incrustações e controla a formação de lama. Por outro lado, uma alcalinidade mais alta provoca formação de espuma e ataca a camada preta protetora de magnetita (Fe_3O_4), podendo provocar corrosão intergranular.

SALINIDADE

Indica a concentração de sais solúveis na água da caldeira; é expressa geralmente em miligramas ou gramas de sais solúveis por litro de água.

SÍLICA

O teor de sílica geralmente é expresso em miligramas de SiO_2 por litro de água. A sílica encontra-se principalmente no estado iônico, podendo-se encontrar também no estado coloidal.

TURBIDEZ

É o inverso da transparência de uma água. Águas superficiais estão mais sujeitas a variações bruscas e sensíveis da turbidêz.

GASES DISSOLVIDOS

a. Oxigênio: sua presença nas águas naturais varia de zero a saturação, conforme a sua origem. É expresso usualmente em miligramas por litro.
b. Anidrido Carbônico: O CO_2 geralmente encontra-se em equilíbrio com os carbonatos e bicarbonatos da água. O CO_2 torna-se agressivo quando em excesso em relação a concentração de equilíbrio. Geralmente expressa-se em miligramas de CO por litro de água.

3. Tratamento Externo

- Remoção dos Contaminantes Indesejáveis

A água considerada ideal para alimentação de caldeiras é aquela que não deposita substâncias incrustantes, não corrói os metais da caldeira e seus acessórios e não ocasiona arraste ou espuma; evidentemente, água com tais características é difícil de se obter, sem antes proceder a um pré-tratamento que permita reduzir as impurezas a um nível compatível, de modo a não prejudicar o funcionamento da caldeira.

A análise físico-química da água a ser utilizada fornece subsídios para a identificação dos contaminantes, permitindo dessa forma, a escolha de um ou mais métodos de tratamento externo, cuja finalidade é alterar a qualidade da água antes do ponto de utilização.

A Tabela 3 descreve somente os principais processos de tratamento externo e suas finalidades, por entendermos que o assunto é muitas vezes complexo, o que impõe informações mais detalhadas.

Tabela 3 - Principais processos de tratamento externo e suas finalidades

Processo	Finalidade
Filtração	• remoção de matéria em suspensão.
Abrandamento com resinas sódicas	• remoção de dureza devido a sais de cálcio e magnésio; • remoção de ferro solúvel.
Desaerador - aquecedor	• remoção de gases dissolvidos (O_2, CO_2, NH_3, H_2S, etc.)
Decantação	• separação de partículas de grande tamanho em suspensão na água.
Clarificação com cal a frio e abrandamento parcial seguido por filtros e abrandadores com resinas	• remoção de dureza de cálcio e magnésio, ferro e matérias em suspensão; • redução de sílica e alcalinidade.
Abrandamento com cal $Ca(OH)_2$	• O uso da cal reduz os bicarbonatos de cálcio e magnésio.
Abrandamento a frio	• redução de dureza de Ca e Mg; • redução de alcalinidade de bicarbonatos; • remoção de matéria suspensa; • redução possível de SiO_2 e Fe.
Processo a quente para remoção de dureza pelo uso de filtros e resinas de troca catiônica, ciclo de sódio	• remoção de dureza, Fe, SiO_2, sólidos dissolvidos e em suspensão e alcalinidade devida a carbonatos

II. Problemas usuais em Geradores de Vapor

1. Introdução

Inúmeros problemas podem ocorrer num Sistema Gerador de Vapor. Tais problemas serão analisados minuciosamente quanto as suas causas, mecanismos prováveis, conseqüências e posteriormente indicar-se-á o método mais adequado de se contorná-los com eficiência.

2. Corrosão

É um dos entraves mais sérios em sistemas geradores de vapor, pois pode ocasionar acidentes, perda de material e parada do equipamento para a manutenção.

A corrosão é um processo eletroquímico capaz de se desenvolver em meio ácido, neutro ou alcalino, na presença ou não de aeração.

2.1 - Tipos de Corrosão

- corrosão uniforme;
- corrosão localizada;
- corrosão por metais dissimilares;
- corrosão por tensão (“stress”);
- corrosão por aeração diferencial devido à formação de depósitos;
- corrosão por ácido carbônico.

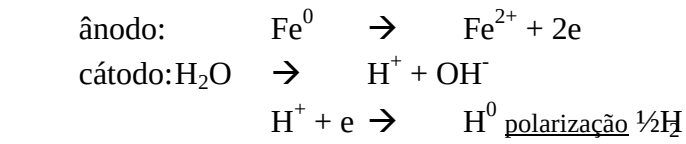
2.2 - Causas, Mecanismos e Conseqüências

Corrosão Uniforme e Localizada

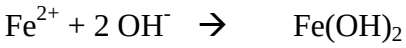
Ocorrem em qualquer seção de qualquer gerador de vapor. A principal causa de ocorrência deste tipo corrosão deve-se a existência de áreas anódicas e catódicas sob diferença de potencial; tais áreas podem se formar nas seguintes condições:

- anomalias na composição granular ou metálica;
- impurezas no metal;
- células de corrosão por aeração diferencial;
- tensão no metal ("stress");

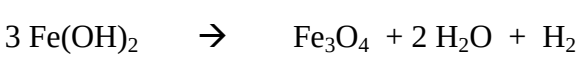
Mecanismo provável



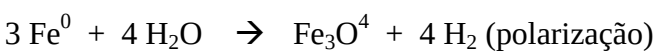
Reações intermediárias:



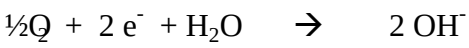
sem O_2:



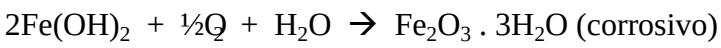
reação principal sem O_2:



na presença de O_2 ocorre a seguinte reação no cátodo:



Outras reações:



$4Fe_3O_4$ (protetor) + O_2 → $6Fe_2O_3$ (não protetor, menos polarizado)

Corrosão por Metais Dissimilares

Ocorre como uma corrosão localizada, devido à diferença de potencial existente entre dois metais diferentes em contato direto numa água contendo sais dissolvidos (eletrólitos), sendo que o metal menos nobre se comporta como um ânodo e se corrói. A severidade de tal corrosão pode ser minimizada pelo uso de metais dissimilares de potenciais de eletrodo próximos e pela separação física destes metais pelo uso de um isolador. Tal fenômeno ocorre mais comumente na seção pós-caldeira de geradores de vapor, operando nas mais variadas pressões.

Corrosão por Tensão ("stress")

Pode ser devida a falhas no projeto da caldeira e de um tratamento térmico inadequado das chapas e tubos metálicos; por exemplo, pontas de tubos de caldeira, nas quais nenhum cuidado relativo a expansão ou contração dos mesmos tenham sido tomadas, se tornam áreas sob "stress" e se corroem anodicamente; outras áreas suscetíveis à corrosão são regiões de alta transferência de calor em zonas de combustão, tubos soldados, tubos mal laminados e com fendas, extremidade de tubos repuxados, tubos incrustados, etc..

Corrosão pela Formação de Depósitos

Entre as possíveis causas da corrosão pode-se citar a presença de tensões localizadas e concentrações salinas sob depósitos; neste caso, o mecanismo provável de corrosão é devido a formação de células de aeração diferencial, onde a área anódica se situa sob os depósitos.

Corrosão por Ácido Carbônico

A solubilização de gás carbônico do ar, bem como a decomposição pelo calor de carbonatos e bicarbonatos e a presença de contaminantes na água de alimentação da caldeira, libera o dióxido de carbono que é arrastado para a seção pós-caldeira, juntamente com o vapor saturado, baixando em conseqüência o pH do condensado formado e atacando a camada protetora de óxido de ferro, provocando uma corrosão grave e generalizada nas linhas de vapor e retorno do condensado.

Mecanismo

HCO_3^- → $OH^- + CO_2\nearrow$

$CO_3^{2-} + H_2O$ → $CO_2 + 2\ OH^-$

$H_2O + CO_2$ ↔ $H_2CO_3^-$

$H_2CO_3^-$ → $H^+ + HCO_3^-$

Fe^0 → Fe^{2+} + 2 elétrons

H_2O ↔ $H^+ + OH^-$

H^+ + elétron → H^0 → ½ H_2

$Fe^{2+} + 2\ OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$

$Fe(HCO_3)_2 \rightarrow Fe(OH)_2 + 2\ CO_2\nearrow + H_2O$ ou

$Fe(HCO_3)_2 \rightarrow FeCO_3 + CO_2\nearrow + H_2O$

2.3 - Reações de Corrosão do Ferro em Diversos Meios

Apenas com intuito ilustrativo, mostra-se abaixo possíveis reações de ataque ao ferro da caldeira, em função do meio.

Meio Ácido

$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\ e^-$

$2\ H^+ + 2\ e^- \rightarrow H_2\nearrow$

O hidrogênico ácido acelera o processo corrosivo, provocando uma corrosão uniforme. Os contaminantes principais são ácidos fracos e sais que se hidrolisam, produzindo o ion H^+.

Meio Neutro ou Básico Aerado

$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\ e^-$

$H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2\ e^- \rightarrow 2\ OH^-$

Para temperaturas acima de 60ºC, ocorrem as reações:

$Fe^{2+} + 2\ OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$

$3\ Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 2\ H_2O + H_2$

Meio Não Aerado

Na ausência de oxigênio, em temperaturas superiores a 220ºC, o ferro é termodinamicamente instável como segue:

$3\ Fe + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4\ H_2\nearrow$

Normalmente, o material de construção dos tubos da caldeira é o aço carbono e mesmo sendo instável a temperaturas acima de 220 ºC, a camada uniforme de magnetita (Fe_3O_4) formada é altamente protetora. Caso os tubos não estejam protegidos, ocorrerá uma corrosão localizada do tipo pite ou alveolar. Estes tipos de falhas nos tubos geralmente ocorrem nas zonas mais quentes da caldeira.

2.4 - Outros Fatores que provocam Corrosão

Entre outros fatores que podem causar ou acelerar o processo corrosivo, pode-se citar:

a. Oxigênio dissolvido: O oxigênio é um agente corrosivo, principalmente nas tubulações superiores das caldeiras fogotubulares (flamotubulares) com reaquecedores e linhas de condensado (processo corrosivo por aeração, onde a região com menor teor de oxigênio é anódica, sendo corroída.

b. Teores elevados de Cloro: Em concentrações altas, reagem rapidamente com o ferro.

c. Presença de Cobre e Níquel: sua presença é responsável pela formação de pilhas galvânicas, principalmente oxidando o ferro pela redução dos óxidos de cobre e de níquel e formando magnetita.

d. Sólidos em Suspensão: Estas se depositam facilmente, de forma não aderente, em regiões estagnantes e de alta transferência de calor, produzindo os tipos de corrosão já mencionados.

e. Choques Térmicos: Devido às condições de trabalho, a temperatura dos tubos da caldeira pode variar consideravelmente e em conseqüência das dilatações térmicas diferenciais pode ocorrer um rompimento entre a camada protetora de magnetita e o aço, provocando em decorrência corrosões localizadas.

f. Combustível Residual: As impurezas deste podem causar problemas de corrosão nas seções de superaquecedor, economizador e pré-aquecedor de ar de um sistema gerador de vapor.

2.5 - Alguns Métodos de Prevenção de Corrosão

Para um controle preventivo da mesma, é indispensável que uma corrosão ligeira ocorra, pois, desta forma, favorece-se a formação de um filme protetor de óxido metálico (Fe_3O_4 ou magnetita).

Entre as medidas usuais, pode-se citar:

a. desmineralização da água por meio de resinas catiônicas e aniônicas.

b. desaeração mecânica da água por intermédio de desaeradores trabalhando com vapor em contracorrente.

c. desaeração química da água usando sulfito de sódio catalisado ou hidrazina.

d. correção do pH da água para a faixa alcalina, a fim de evitar corrosão ácida e acelerar a formação do filme de óxido de ferro protetor.

e. tratamento do vapor condensado para neutralizar ácido carbônico e eliminar ataque ao ferro pelo cobre e níquel.

f. resfriamento lento da caldeira, quando a mesma é retirada de operação, a fim de evitar choques térmicos.

g. em caldeiras de baixa pressão, com temperaturas inferiores a 200ºC, pode-se eliminar a desmineralização e desaeração em muitos casos não dispensando, todavia, o uso de água clarificada.

3. Depósitos

3.1 - Introdução

Os depósitos são responsáveis por inúmeros problemas em geradores de vapor. Ocorrem geralmente na seção pós-caldeira e caldeira de sistemas operando a baixa e media pressões. Em sistemas operando a pressões muito altas, ocorrem geralmente na caldeira.

3.2 - Causas

A formação de depósitos ocorre nos tubos e equipamentos de um sistema gerador de vapor, devido aos seguintes fatores:

- excesso de impurezas na água de alimentação
- contaminação do vapor e do condensado
- transferência dos produtos de corrosão de um local a outro
- inadequação da aplicação de produtos destinados ao tratamento químico da água.

3.3 - Tipos

Entre as incrustações nos tubos de caldeiras provenientes de sais minerais dissolvidos encontrados na água de alimentação, pode-se citar: carbonate de cálcio, sulfate de cálcio, silicatos de cálcio e magnésio, silicatos complexos contendo ferro, alumina, cálcio e sódio, borras de fosfatos de cálcio ou magnésio e óxidos de ferro não protetores.

A concentração crescente destes sais na água da caldeira devido a evaporação continua da água, faz com que estes compostos solúveis atinjam seu limite de solubilidade numa dada temperatura, precipitando-os. Isto acarretará a rigor, a formação de dois tipos de depósitos:

- incrustações
- lamas

As incrustações são duras e aderentes. Formam-se pelo crescimento cristalino dos sais cuja solubilidade é inversamente proporcional à temperatura. As lamas são mais moles e menos aderentes. São provenientes de sais cujo limite de solubilidade é ultrapassado na temperatura em que se encontram.

Em suma, o tipo de depósito formado é função, entre outras, da:

1. qualidade da água de reposição e tratamento químico usado
2. concentração de sólidos totais dissolvidos
3. contaminação da água de alimentação

3.4 - Conseqüências

A formação de crostas aderentes ou não na superfície de aquecimento de caldeiras atua como um isolante térmico de baixa condutividade reduzindo a taxa de transferência de calor da chama e dos gases de combustão para a água, aumentando portanto, o consumo de combustível para a mesma produção de vapor.

Quanto maior a temperatura de operação de uma caldeira, menor tolerância aos depósitos ela oferece; conseqüentemente, a presença de depósitos além de retardar a troca de calor, pode romper os tubos de metal da caldeira, promover perda de resistência mecânica e deformações, devido ao superaquecimento dos mesmos, além de restringir a área do fluxo de escoamento na linha e possíveis obstruções nas válvulas, resultando em perdas e reposições caras.

4. Arraste

Arraste representa uma condição de transporte da água e suas impurezas minerais pelo vapor destinado à seção pós-caldeira; tal fenômeno ocorre em caldeiras que operam nas mais diversas pressões. O arraste influi diretamente na pureza do vapor.

4.1 - Causas

As causas do arraste podem ser mecânicas ou químicas. As mecânicas são devidas a flutuações repentinas e excessivas de cargas e operação em níveis superiores ao projetado, entre outras. As químicas são devidas à presença excessiva de sólidos dissolvidos ou. Em suspensão, sílica ou alcalinidade.

4.2 - Mecanismo - Tipos de Arraste

O arraste, na realidade, engloba três fenômenos paralelos e simultâneos:

- a formação de espuma;
- o arraste propriamente dito e
- o arrebatamento da água pelo vapor

Um nível muito alto na caldeira pode causar arraste de água por meio do vapor. No instante que a bolha de vapor formada se rompe, leva consigo parte da água e as impurezas nela contidas. Um superaquecimento da água, ou a abertura brusca de uma válvula com

retirada de grande quantidade de vapor provoca uma queda de pressão acima da água, ocorrendo em decorrência uma ebulição violenta e tumultuosa, com arraste de água e suas impurezas, responsáveis pela formação de depósitos nas linhas de vapor.

O arrebatamento de água pelo vapor é de grande gravidade, principalmente quando o vapor gerado é destinado a produção de energia, devido aos choques térmicos nos aquecedores e choques mecânicos nas turbinas.

A tabela a seguir, fornece um resumo das principais razões mecânicas e químicas do arraste:

Mecânicas	Químicas
• nível de água alto • condições de carga excessiva • falhas no projeto da caldeira	• excesso de sólidos em suspensão; • excesso de sólidos totais dissolvidos; • excesso de alcalinidade total • presença de contaminações oleosas; • excesso de sílica.

4.3 - Conseqüências

As principais conseqüências do arraste podem ser melhor visualizadas abaixo:

- danos nas turbinas
- manutenção cara
- formação de depósitos nos separadores e válvulas de redução
- formação de depósitos no aparelho separador de vapor
- formação de depósitos na seção pós-caldeira
- produtos danificados
- perda de produção

5. Outros Problemas

5.1 - Ataque cáustico ou Corrosão Cáustica

É provocado por um excesso de soda cáustica na água da caldeira, embora altas concentrações de hidróxido sejam desejáveis para proteção de superfícies de aço.

Finalidades benéficas do uso adequado da Soda Cáustica

a. manter a concentração de OH^- numa faixa adequada a formação de magnetita (Fe_30_4) protetora nas superfícies de aço.

b. formar lamas não aderentes ao invés de incrustações, quando na água da caldeira há presença de sais de dureza.

Um excesso de NaOH na superfície de aço provoca as seguintes reações de corrosão:

$$Fe_3O_4 + 4\,NaOH \rightarrow 2\,NaFeO_2 + 2\,H_2O$$

$$Fe^0 + 2\,NaOH \rightarrow Na_2FeO_2 + H_2\nearrow$$

Como conseqüência de uma concentração elevada de NaOH em certas áreas do gerador de vapor, ocorre corrosão localizada e severa, provocando fissuras no metal e podendo ocorrer explosões, resultando em produção perdida e substituições caras. Tais fenômenos são mais freqüentes em sistemas de alta pressão.

Para se evitar o ataque cáustico basta seguir as recomendações abaixo:

- manter as superfícies metálicas da caldeira limpas

- evitar a presença de dureza na água de alimentação

- manter as concentrações de cobre e ferro em níveis baixos, para se evitar depósitos e incrustações por óxidos metálicos.

5.2 - Fragilização por Hidrogênio

Ocorre geralmente em caldeiras de alta pressão devido a penetração de átomos e nitrogênio, provenientes de reações e corrosão (ataque cáustico devido a excesso de alcalinidade), nos interstícios do metal dos tubos da caldeira, provocando fadiga interna no aço, tornando-o frágil pela formação de bolhas de metano no metal. Tal processo pode ser acelerado por tensões residuais provocadas por deformações do metal. Como conseqüência disto, podem ocorrer rompimentos dos tubos da caldeira, com explosões violentas e danos imprevisíveis.

As reações prováveis que ocorrem são:

$$4\,H^0 + Fe_3C \rightarrow CH_4 + 3Fe$$

$$2\,H^0 \rightarrow H_2\nearrow$$

Entre as medidas preventivas mais eficazes a serem tomadas pode-se destacar:
- manutenção das superfícies metálicas isentas de depósitos
- prevenção de alcalinidade excessiva.

5.3 - Volatilização da Sílica

Geralmente e um problema que ocorre de forma que geradores de vapor que operam a altas pressões e a altas taxas de geração de vapor, devido a volatilização da sílica e seu transporte juntamente com o vapor, o que pode ocasionar posteriormente depósitos em turbinas, desbalanceando-as. Nos processos atuais de purificação da água destinada a geradores de vapor de alta pressão, consegue-se eliminar a quase totalidade dos sais incrustantes, mas não a sílica, que pode se encontrar em excesso para a pressão e temperatura de operação da caldeira. A manutenção de um pH elevado na água auxilia a manter a sílica em solução sob a forma de silicatos.

5.4 - Fragilidade Cáustica

A corrosão por tensão do aço - carbono do gerador de vapor provoca rachaduras intercristalinas decorrentes da reação de corrosão nos interstícios dos grãos do metal.

As condições mais favoráveis à ocorrência de fragilidade cáustica são:

1. tensão de tração no metal;

2. alta alcalinidade hidróxida em contato com o metal sob tensão;

3. certas características da água utilizada.

O procedimento usual para se evitar tal fenômeno consiste na adição de um inibidor à água do gerador de vapor.

III - CORREÇÃO DE PROBLEMAS

1. Introdução

Qualquer sistema gerador de vapor é potencialmente sujeito a série de problemas descritos anteriormente. Para sistemas operando altas pressões, os cuidados necessários são maiores, devido aos altos riscos envolvidos. O valor representado por uma caldeira impõe a necessidade de sua conservação através de cuidados preventivos obtidos mediante o tratamento adequado da água e do equipamento como um todo, visando tirar o máximo proveito útil do sistema, evitando paradas desnecessárias, manutenção freqüente e diminuindo os custos totais.

2. Objetivos

Os objetivos principais do tratamento de água de uma caldeira são três, a saber:

1. prevenir a formação de depósitos
2. controlar a corrosão dos metais
3. prevenir arraste de água da caldeira

O tratamento de água é função do tipo de caldeira, sua pressão de trabalho e composição da água, da taxa de vaporização e do modo de utilização do vapor, entre outros.

3. Corrosão

3.1 - Eliminação de Oxigênio Dissolvido

A água de alimentação, a água da caldeira e o condensado devem estar isentas de oxigênio dissolvido. O melhor método físico de se evitar a introdução de ar na seção pré-caldeira é pelo uso de um aquecedor-desaerador. A remoção completa do oxigênio dissolvido é assegurada por um tratamento químico bem realizado, baseado em sulfito de sódio, usado com catalisador a temperaturas inferiores a 90 ºC. O uso de sulfito é limitado a caldeiras de baixa e media pressão, devido a possibilidade da sua decomposição em gases sulfídrico (H_2S) e anidrido sulfuroso (SO_2) a altas pressões e o conseqüente abaixamento do pH do meio, pondo em risco as tubulações e equipamentos da seção pós-caldeira.

A reação de desoxigenação mais favorecida em meio alcalino é a seguinte:

$$Na_2SO_3 + \tfrac{1}{2} O_2 \rightarrow Na_2SO_4$$

O produto da reação é o sulfato de sódio, um sólido solúvel, o que acarreta um aumento no teor de sólidos dissolvidos totais na caldeira, exigindo portanto um maior número de descargas.

Um outro agente químico que pode ser utilizado em caldeiras como sequestrante de oxigênio é a hidrazina, cuja vantagem consiste em não aumentar o teor de sólidos dissolvidos na água. A reação que ocorre é a seguinte:

$$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$$

Os produtos da reação são a água e o nitrogênio (um gás inerte). A hidrazina, por ser um produto de características voláteis, age também nas linhas de vapor e condensado, conferindo proteção contra a corrosão por "pites".

A hidrazina é também o produto indicado para caldeiras de alta pressão, devido a sua propriedade de reconverter o óxido de ferro em uma camada protetora de magnetita (Fe_3O_4), impedindo a ação de agentes corrosivos que normalmente atuariam sob os depósitos de óxido de ferro, provocando corrosão nos tubos da caldeira.

A reação que ocorre é:

$$6\ Fe_2O_3 + N_2H_4 \rightarrow N_2 + 2\ H_20 + 4\ Fe_3O_4$$

A introdução de hidrazina - na seção pré-caldeira requer o uso de um catalisador, para acelerar a reação de seqüestro de oxigênio, principalmente à temperaturas abaixo de 60 - 80 ºC. À temperatura acima de 150 ºC, a reação praticamente é instantânea, não exigindo o emprego de catalisadores.

A correta dosagem de hidrazina é muito importante porque um excesso poderá provocar a decomposição da mesma com a formação de nitrogênio e amônia.

$$3\ N_2H_4 \rightarrow N_2 + 4\ NH_3$$

A amônia possui ação corrosiva (principalmente na presença de oxigênio tragos) no cobre e suas ligas, que geralmente também estão presentes num sistema gerador de vapor.

3.2 - Eliminação de Gás-Carbônico

Como dito anteriormente, a presença de gás carbônico dissolvido pode causar quedas sensíveis de pH, tornando o meio agressivo ao metal.

Um dos métodos físicos de eliminação de CO_2 consiste no uso de um aquecedor-desaerador. Para assegurar uma eliminação completa de CO_2 recorre-se a métodos químicos, com o emprego de produtos neutralizantes ou inibidores formadores de filmes.

Entre os produtos de ação neutralizante no combate ao gás carbônico, citam-se a amônia e aminas voláteis, tais como a morfolina e a ciclohexilamina.

A amônia só é efetiva como neutralizante do gás carbônico em baixas dosagens. Todavia, altas dosagens de amônia num meio principalmente aerado, atacam o cobre e suas ligas.

As aminas voláteis, tais como morfolina e ciclohexilamina neutralizam o gás carbônico, formando bicarbonatos e aumentando o pH do condensado, mantendo a alcalinidade necessária para a inibição de corrosão no sistema.

Um outro fator a considerar na aplicação de tais produtos consiste no coeficiente de separação dos mesmos, ou seja, a relação da concentração. de um produto volátil na fase vapor e da concentração no condensado formado. O coeficiente de separação da ciclohexilamina é próximo de 3, enquanto que o da morfolina é da ordem de 0,5. Consequentemente, a morfolina é mais indicada em circuitos que veiculam o vapor úmido.

Inibidores formadores de filmes, como a octadecilamina, usada sozinha ou em combinação com morfolina, ciclohexilamina ou hidrazina, tem aplicação no controle de corrosão na seção pós-caldeira.

Estes inibidores formam uma película aderente e resistente a água na superfície metálica, de maneira a evitar o contato direto entre o metal e os agentes corrosivos, controlando, portanto, a corrosão por vapor e condensado.

A presença prévia de depósitos na superfície metálica, antes da aplicação do filme, diminui a eficiência anticorrosiva do mesmo.

Há necessidade de alimentação contínua do inibidor, devido a alta velocidade de erosão do filme formado.

Pode-se também, controlar a corrosão por ácido carbônico, pela combinação no uso de neutralizantes e inibidores de filme.

3.3 - Controle de pH e Depósitos

Um valor baixo de pH acentua a tendência corrosiva de uma água, devido ao alto teor de íons de hidrogênio. O pH da água em qualquer parte de um sistema gerador de vapor deve ser mantido o suficientemente alto para controlar a corrosão; isto é feito pela adição de um reagente alcalino e controle do pH numa faixa conveniente.

O reagente alcalino a ser usado (geralmente soda cáustica) e sua dosagem, depende da pressão de trabalho da caldeira.

4. Depósitos

4.1 - Introdução

Existem inúmeras maneiras de se evitar a formação de depósitos (incrustações e lamas) num sistema gerador de vapor, proporcionando uma operação e de bom rendimento do equipamento diminuindo-se acentuadamente os gastos na manutenção do sistema e economizando-se sensivelmente o combustível, de suma importância nos dias atuais.

4.2 - Uso de Água de Reposição Apropriada

Como mencionado anteriormente a remoção de impurezas indesejáveis da água minimiza os efeitos de depósitos.

4.3 - Comentários sobre Água Condensada

O condensado retornado à água de alimentação da caldeira pode encontrar-se contaminado por impurezas provenientes do arraste da água impureza provenientes do processo industrial. Em tal caso o uso purificadores de condensado proporcionam a obtenção de um condensado de alta pureza, que mediante alguns controles analíticos permite determinar a qualidade da água condensada.

4.4 - Uso de um Tratamento Químico Adequado

A escolha adequada de um programa de tratamento permite controlar da melhor maneira possível a formação de depósitos.

5. Descargas

5.1 - Definição

A descarga pode ser entendida como a eliminação periódica de uma parcela da água concentrada no gerador de vapor, visando manter o nível máximo de sólidos dissolvidos e em suspensão no sistema.

5.2 - Ciclos de Concentração em Geradores de Vapor

Representa o número de vezes que os sólidos da água de reposição ou de alimentação estão concentrados na caldeira, em um dado volume de água. Os ciclos de concentração são regulados pelas taxas de descargas.

5.3 - Tipos de Descargas

5.3.1 - Descargas de Nível

São continues e visam limitar o teor admissível de sólidos dissolvidos na água do gerador de vapor. Controla os ciclos de concentração (sólidos em suspensão, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade ou sílica. Um controle automático das descargas de nível apresenta as seguintes vantagens:

- aumenta a economia na operação do sistema;
- evita arraste devido ao alto teor de sólidos;
- evita desperdício de água, de combustível e de produtos destinados ao tratamento.

5.3.2 - Descargas de Fundo

São intermitentes e removem a lama e parte dos sólidos dissolvidos. Tais descargas são manuais e sua importância aumenta quando a concentração de lama na água da caldeira é alta. As descargas de curta duração são mais eficientes que as de longa duração.

- descargas de curta duração (5 a 15 segundos): eliminam menor quantidade de água concentrada e grande quantidade de lama formada. São aplicadas em maior número.
- descargas de longa duração (15 a 60 segundos): eliminam mais água concentrada e sais dissolvidos e pouca lama. São aplicadas em menor número.

Em suma, a freqüência das descargas de fundo (manual) depende do tipo de água utilizada, tipo de caldeira e capacidade de vaporização, condições de funcionamento, etc. A prática local permite avaliar a melhor aplicação a ser estabelecida.

5.4 - Conseqüências de Descargas Irregulares

Descargas não controladas criam problemas de superconcentração dos sais dissolvidos na água da caldeira, acúmulo excessivo e perigoso de lama, etc. A concentração excessiva de sais na água da caldeira resulta em fenômenos de espumação, elevação do ponto de ebulição, etc., que danificam as linhas de vapor, purgadores, paletas das turbinas, etc., bem como, eleva o consumo de combustível.

6. Programas Apropriados para Tratamento Químico

6.1 - Introdução

Existem vários métodos de tratamento da água de um sistema gerador de vapor. Um dos mais comuns é o método da precipitação (floculação), aplicável a praticamente todas as caldeiras de baixa e média pressão (principalmente para as caldeiras fogotubulares).

Caldeiras de alta pressão, por necessitarem de uma água de alimentação de alta pureza, muitas vezes requerem um tratamento químico mais simplificado, embora um controle mais rígido das características da água seja de todo conveniente.

Uma alta concentração de sais provoca também um aumento de alcalinidade e esta, por sua vez, provoca a formação de espuma na caldeira e o arraste de água para dentro da tubulação, provocando os danos já mencionados.

A adição de produtos químicos para tratamento não elimina totalmente as substâncias estranhas da água, mas estas não apresentam mais sua agressividade inicial; elas ou se depositam na forma de lama no fundo da caldeira ou continuam em suspensão.

6.2 - Programa de Fosfatos

Este programa consiste na aplicação de um ou mais dos produtos químicos abaixo discriminados, com o intuito de proporcionar uma ação múltipla:

- fosfatos;
- sulfito de sódio ou hidrazina;
- condicionadores orgânicos de lama;
- anti-espumantes;
- soda cáustica, quando necessário;
- agente para controle de corrosão na seção pós-caldeira.

A dureza do cálcio que penetra na caldeira juntamente com a água de alimentação reage com complexos (ortofosfatos e/ou polifosfatos), formando uma lama mole e não aderente, facilmente removível da caldeira através de descargas regulares. Dependendo do fosfato complexo usado, se torna necessário a inclusão de soda cáustica, que precipita a dureza de magnésio e reage com a sílica porventura presente. Estas reações são favorecidas pelo meio alcalino.

As reações que ocorrem são:

$$10\ Ca^{2+} + 6\ PO_4^{3-} + 2\ OH^- \rightarrow \quad 2\ Ca_3(PO_4)_2.Ca(OH)_2$$

hidroxiapatita

$$3\ Mg^{2+} + 2\ OH^- + 2\ SiO_3^{2-} + H_2O \rightarrow 2\ MgSiO_3\ .\ Mg(OH)_2\ .H_2O$$

serpentina

$$Mg^{2+} + 2\ OH^- \rightarrow \quad Mg(OH)_2$$

Como já citado previamente, o sulfito ou hidrazina retiram quimicamente o remanescente de oxigênio dissolvido após a desaeração mecânica.

Os condicionadores orgânicos de lama consistem de um polímero, usualmente aniônico e um polieletrólito orgânico. Estes condicionam a lama da água da caldeira, eliminando ou prevenindo a formação de depósitos que provém de sais cujos limites de solubilidade são ultrapassados pela concentração excessiva de sais numa dada temperatura.

O emprego de anti-espumantes, como de qualquer outro produto é função das características da água utilizada na caldeira, bem como, das condições de operação desta. Os anti-espumantes são geralmente baseados em poliglicóicos e poliamidas. Entre algumas das vantagens, pode-se citar:

- redução do arraste químico;

- redução do consume de combustível diminuindo a freqüência de descargas e melhorando a qualidade do vapor;

O controle de corrosão na seção pós-caldeira é feito pela aplicação adequada de aminas neutralizadoras ou aminas formadoras de filme, como já mencionado anteriormente.

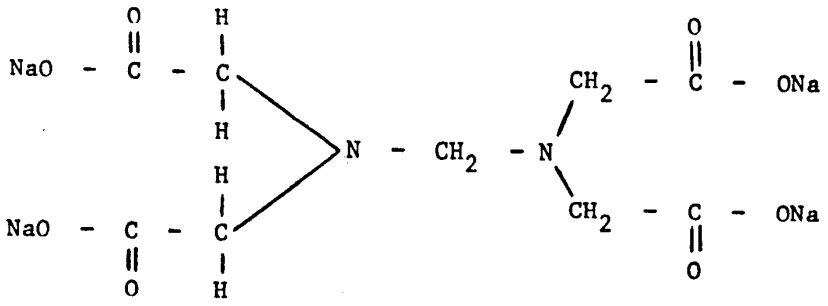
6.3 - Programa de Quelantes

Este programa baseia-se na aplicação equilibrada de um ou mais dos produtos químicos abaixo discriminados:

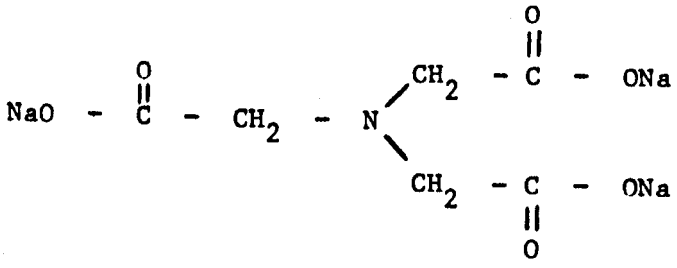
- sais de EDTA (sais do ácido etileno diamino tetracético) ou de NTA (sais do ácido nitrilo tetracético)

- soda cáustica, se necessário
- agentes sequestrantes de oxigênio (sulfito de sódio ou hidrazina)
- condicionadores de lama, quando conveniente
- sequestrantes de ferro e agentes dispersantes
- agentes anti-espumantes

Os quelantes de EDTA a NTA são reagentes estequiométricos que reagem com cátions di e trivalentes (cátions de cálcio, magnésio, ferro II e cobre II), formando complexos solúveis e estáveis ao calor e evitando a formação de depósitos nas superfícies metálicas pela alteração da estrutura química das impurezas da água. As estruturas dos sais de EDTA e NTA estão indicadas abaixo:



Sal de EDTA



Sal de NTA

A estabilidade térmica do NTA é maior que a do EDTA a altas temperaturas; todavia, os produtos da degradação do NTA, ao contrário do EDTA, não são agentes quelantes. A degradação se inicia a temperaturas superiores a 200 ºC.

Via de regra, a estabilidade térmica dos quelantes de NTA e EDTA depende dos seguintes parâmetros:

- temperatura de utilização;

- pH da água do gerador de vapor;

- presença de agentes oxidantes e de sais na água da caldeira;

- tempo de residência do quelante e de sua presença em pontos quentes do gerador de vapor.

De qualquer modo, os agentes quelantes de EDTA e NTA são os mais usados no tratamento de água de caldeiras.

As vezes se torna necessário a inclusão da soda cáustica para controle de pH e alcalinidade, favorecendo a atuação dos quelantes na formação dos complexos solúveis.

Os condicionadores orgânicos de lama inibem a formação de incrustações e auxiliam a dispersão da lama formada mesmo por um programa baseado em quelantes. Tais condicionadores podem ser constituídos de polímeros naturais ou sintéticos que alteram o comportamento físico-químico dos depósitos. A aplicação das descargas de fundo elimina a lama formada e auxilia na manutenção do gerador de vapor limpo.

O emprego de sequestrantes de ferro e agentes dispersantes se torna necessário para complementar efetivamente a atuação dos quelantes e evitar a deposição de óxidos de ferro nas superfícies metálicas.

Os agentes anti-espumantes, além das finalidades mencionadas no programa de fosfato, devem ser empregados em dosagens que não ultrapassem o teor máximo permissível de sólidos dissolvidos na água.

6.4 - Combinação de Ambos

Às vezes utiliza-se fosfatos juntamente com quelantes, com o intuito de reforçar a ação destes. O tratamento com esta combinação sinergística, quando não bem conduzido e sem a presença dos condicionadores de lama de fosfatos, resulta na formação de eventuais depósitos, devido a competição entre quelantes e fosfatos pelos íons de cálcio e magnésio. A opção por este tratamento depende das características da água e do gerador de vapor já mencionadas anteriormente.

6.5 - Discussão dos Programas

A opção por um dado programa de tratamento é ditada, principalmente, por razões econômicas. Numa instalação que se utilize de uma água de reposição dura, torna-se antieconômico um programa de quelantes. Geradores de vapor mais sujeitos a formações. de lama devem ser submetidos programas de fosfatos. De qualquer forma, a opção por um dado tratamento recai, principalmente, em fatores técnicos e econômicos.

6.6 - Controle do Arraste

O arraste pode, ser devido a condições mecânicas ou químicas.

O primeiro não pode ser corrigido por tratamentos químicos. O arraste devido a condições químicas pode ser minimizado com o uso de anti-espumantes, aliado a descargas regulares de lama, evitando a deposição da mesma nos tubos da caldeira e assegurando, portanto, um funcionamento seguro e perfeito da unidade.

As descargas regulam os sólidos totais, alcalinidade, sílica e sólidos suspensos em níveis toleráveis, não prejudiciais à operação.

As contaminações oleosas porventura presentes na água da caldeira são responsáveis pela formação de espuma e arraste, devendo, portanto, serem evitadas.

6.7 - Alimentação dos Produtos Químicos

6.7.1 Introdução

Os produtos químicos destinados ao tratamento interno de um sistema apresentam sua máxima eficiência quando introduzidos no sistema de modo correto e nas dosagens certas, mantendo-se ainda as dosagens residuais ideais. Além da utilização adequada dos equipamentos de alimentação de produtos químicos e dos controles analíticos, necessários para regular mecanismo de alimentação, cabe ao operador, em última instância, o sucesso de um programa de tratamento.

6.7.2 - Pontos de Alimentação dos Produtos

A alimentação de produtos químicos para sistemas geradores de vapor, geralmente é contínua, podendo ser manual ou automática, quando dispositivos especiais permitem corrigir a dosagem de alimentação em resposta a uma variável perturbada (pH, condutividade, etc.). Os produtos químicos utilizados, geralmente são líquidos ou soluções preparadas a partir de pó.

As bombas dosadoras de deslocamento positivo são os equipamentos mais indicados para a alimentação dos produtos corretivos, devido ao alto grau de confiabilidade e precisão das mesmas.

Dependendo dos tipos de produtos usados no tratamento e de suas compatibilidades, pode-se alimentá-los no mesmo dosador e injetá-los no mesmo ponto do sistema, sem provocar danos dignos de nota na eficiência do tratamento.

Às vezes, são necessários outros dosadores e outros pontos de aplicação dos produtos no sistema.

Abaixo, mostra-se os pontos mais indicados de introdução dos diversos produtos químicos, destinados ao tratamento interno da água do gerador de vapor:

- **fosfatos**: geralmente, são alimentados diretamente no Gerador de vapor. Fosfatos complexos, como polifosfatos, podem ser adicionados na caldeira ou na seção pré-caldeira, enquanto que os ortofosfatos devem ser aplicados diretamente na caldeira, para se evitar uma reação antecipada ainda na linha de água de alimentação

- **sequestrante de oxigênio**: devem ser introduzidos no setor de armazenamento de um desaerador e, na ausência deste, no coletor de condensado. De qualquer forma, é imprescindível a alimentação do sequestrante de oxigênio muito antes do gerador de vapor, para proporcionar um tempo suficiente para assegurar a reação.

- **quelantes**: devem ser introduzidos na linha da água de alimentação, ainda na seção pré-caldeira e livre de oxigênio, pois, este pode ocasionar a degradação dos quelantes. Os quelantes nunca devem ser alimentados antes de trocadores de calor de cobre e/ou suas ligas, devido a sua grande afinidade química por estes. Os quelantes não devem também ser alimentados diretamente ao tubulão da caldeira, devido a sua ação corrosiva pronunciada a altas temperaturas e concentrações. Uma dosagem excessiva de quelantes na água da caldeira, pode acarretar corrosão no metal da mesma, pela formação de um complexo com o filme protetor de óxido metálico da superfície. Consequentemente, além de uma alimentação criteriosa, deve-se controlar a concentração de quelante livre, bem como o teor de quelante total na água da caldeira.

- **dispersantes, aminas neutralizantes, anti-espumantes e álcalis**: podem ser introduzidos no setor de armazenamento de um desaerador ou diretamente na linha da água de alimentação ou no gerador de vapor.

- aminas fílmicas: conforme o tipo, podem ser alimentadas diretamente na seção pré-caldeira ou caldeira, todavia, é preferível sua alimentação diretamente no coletor de vapor.

Os condicionadores de Lama podem ser alimentados no setor de armazenamento de um desaerador ou na linha de alimentação da água da caldeira.

IV - Cuidados para Geradores de Alta-Pressão

Em sistemas geradores de vapor, não existe uma faixa definida que diferencia quando um gerador de vapor é de alta ou baixa pressão.

Muitas vezes, a experiência indica o melhor tratamento a ser seguido em qualquer sistema.

O tratamento de caldeiras de baixa pressão é mais complexo, devido a presença de impurezas na água; o tratamento se torna mais difícil, devido ao controle que deve ser mantido nas características da água.

Numa caldeira de alta pressão (acima de 40 kgf/cm^2), a água de alimentação deve ser submetida a processos de purificação, de modo a eliminar a quase totalidade de Impurezas e sais de dureza.

Em tais sistemas, deve-se tomar cuidados especiais quanto a corrosão e a formação de depósitos provenientes de produtos de corrosão.

Entre os problemas usuais que ocorrem, pode-se citar.

- superaquecimento;
- fragilização por hidrogênio;
- ataque cáustico ou corrosão cáustica;
- fragilização cáustica;
- volatilização de sílica;

O tratamento de caldeiras de alta pressão, em certos aspectos, se torna mais simplificado. O objetivo principal é evitar a corrosão pelo oxigênio e a corrosão cáustica.

Os produtos geralmente empregados são:

- fosfatos e soda cáustica, quando necessário;
- hidrazina;
- aminas voláteis.

A finalidade de tais produtos já foi mencionada anteriormente.

V - Pré-Limpeza e Pré-Tratamento de Sistemas

1. Introdução

Durante a instalação de um sistema de geração de vapor novo, é muito comum a presença de uma série de impurezas decorrentes da estocagem dos equipamentos ao ar livre e sujeito a todas as intempéries possíveis. Durante a própria montagem, ocorre ainda contaminações por óleo, graxa e produtos de corrosão. Muitas vezes, um sistema já instalado e em operação se encontra sobremaneira incrustado, que se torna praticamente anti-producente seu manuseio e altos riscos são envolvidos.

Para contornar estes problemas, é conveniente realizar uma pré-Iimpeza e um pré-tratamento dos equipamentos destinados a geração de vapor, quando no início de operação, ou, quando por circunstâncias adversas, o sistema já se encontrava em operação.

2. Métodos

Pode-se utilizar métodos mecânicos ou químicos de limpeza de equipamentos. Os métodos mecânicos, geralmente, são de alto custo e demorados.

Os químicos:

- **lavagem química**: é necessária, num caso extremo, quando os tubos da caldeira se mostram com incrustações de espessura considerável devido a condições inadequadas de operação do sistema por longos períodos.

Entre as etapas de uma lavagem química, duas se destacam:

1. lavagem com ácido: emprega geralmente ácidos inibidos, ácido sulfâmico ou ácido clorídrico; os inibidores de ácido geralmente, são constituídos de substâncias minerais ou orgânicas.

O emprego de inibidores efetivos não elimina por completo a corrosão pois, somente reduz a velocidade e a amplitude do ataque.

É muito importante a eliminação complete dos resíduos após a lavagem, antes do sistema entrar novamente em operação para se evitar graves riscos de corrosões localizadas.

2. ebulição alcalina: muitas vezes numa água de caldeira que contenha sílica, o emprego de ácido clorídrico inibido, num programa de limpeza ácida, não elimina a sílica presente.

A introdução, em dosagens controladas, de compostos alcalinos, seguida de uma ebulição da água, auxilia a formação de silicatos solúveis, o que permite a eliminação da sílica presente em crostas através das descargas aplicadas.

Em qualquer das etapas de uma lavagem química, é indispensável um estudo criterioso do tratamento a ser empregado e seu modo de aplicação, para satisfazer a todas as condições existentes.

VI - Proteção de Caldeiras Temporariamente Ociosas

1. Introdução

Geradores de vapor usados intermitentemente, ficam mais sujeitos a problemas de depósitos. Num gerador parado, os sólidos em suspensão decantam e se depositam nas superfícies metálicas. Com o decorrer do tempo, tais depósitos se endurecem e quando o gerador volta a funcionar, estes depósitos se cozinham devido ao aquecimento, formando crostas duras e aderentes nas superfícies metálicas.

A proteção é necessária para aumentar a vida útil do equipamento, bem como, sua eficiência.

Um ataque corrosivo em períodos de ociosidade acarreta perda de metal, além de liberar produtos de corrosão da seção pré-caldeira durante as paradas para a manutenção, o que, nas fases subseqüentes de operação, gera depósitos, superaquecimento e ataques corrosivos localizados nos tubos do gerador de vapor.

Para se obter a manutenção preventiva mais eficiente, deve--se proceder aos controles de corrosão durante as etapas de parada, partida e quando da operação do sistema.

2. Desativação Temporária das Caldeiras

E indispensável eliminar a maior quantidade possível de lama de uma caldeira que vai ser inativada por algum tempo. Deve-se durante a operação de inativação proceder a descargas de fundo freqüentes por alguns dias, seguidas por dosagens crescentes de condicionadores de lama, para evitar a deposição de sólidos em suspensão.

Após a drenagem da caldeira, deve-se lavar a mesma abundantemente com água e alta pressão.

3. Técnicas de Proteção

O oxigênio, a água e o pH são os fatores que mais afetam a corrosão em geradores de vapor ociosos.

Inúmeros métodos podem ser empregados na proteção dos sistemas, dependendo de:

- tempo de parada;
- grau de disponibilidade do equipamento

4. Inativação a seco da Caldeira

Objetiva-se eliminar a água e reduzir a umidade relativa do ar a um valor conveniente.

Inativação por nitrogênio: Utiliza-se o nitrogênio (gás inerte) para deslocar o ar do gerador de vapor, controlando desta forma a corrosão.

Inativação a úmido: Enche-se a caldeira com água aquecida (água de alimentação desaerada ou condensado), emprega-se inibidores de corrosão, ou seja, seqüestrantes de oxigênio (sulfito ou hidrazina), mantendo um teor residual do mesmo, que deve ser controlado periodicamente para constatar eventuais infiltrações de oxigênio e proceder às correções necessárias. Concomitantemente, o pH da água deve ser mantido na faixa alcalina, com o uso de soda cáustica, por exemplo, num teor suficiente para controlar o pH em torno de 10 - 11,5.

Via de regra, a inativação a úmido é empregada em sistemas cuja parada não exceda um mês e que requeiram disponibilidade imediata de operação.

Em contrapartida, a inativação a seco é mais empregada em sistemas cujas paradas não excedam a um mês e não necessitem de operação imediata.

VII - Controles Analíticos

1. Importância

O controle adequado da água utilizada num sistema gerador de vapor é imprescindível para se evitar incidências de corrosão, incrustação e arraste.

A análise química de uma água permite avaliar sua composição bruta, que aliada às características técnicas da caldeira oferece subsídios quanto a escolha dos processos físicos de purificação que se fazem necessários, bem como, o tratamento químico propriamente dito.

Além do mais, a análise de uma água deve ser feita regularmente, para se verificar eventuais alterações nas qualidades da mesma, o que fornece de recursos necessários para as correções posteriores e controle das dosagens de produtos químicos adicionados. A periodicidade de uma análise varia muito com as condições de operação da caldeira e da natureza e gravidade do problemas constatados.

2. Parâmetros Usuais Analisados

Coletadas amostras de água de diversos pontos do gerador de vapor, inúmeras determinações devem ser feitas, de modo a ter subsídios suficientes para as medidas corretivas que se mostrarem necessárias.

As determinações mais corriqueiras constam de medidas de: pH, dureza, alcalinidade, salinidade, teor de sílica, fosfatos, gases dissolvidos teor de ferro, teor de cloretos, teor de sólidos dissolvidos.

2.1 - Em Campo

Devido a simplicidade de execução, medidas em campo de pH, dureza, alcalinidade, cloretos e fosfatos são suficientes para observar o comportamento do sistema e proceder as correções iniciais das dosagens.

2.2 - Em Laboratório

No laboratório da empresa tratadora da água destinada a geradores de vapor, procede-se não só às análises feitas em campo, como também determinações mais precisas e delicadas do teor de sílica, sólidos dissolvidos, de cloretos, de ferro, gases dissolvidos e outras características, conforme a necessidade.

3. Testes Usuais

Usualmente, coletam-se amostras de água de vários pontos do gerador de vapor, sendo que determinadas características peculiares recebem mais destaque na análise, como indicado abaixo:

3.1 - Água de Alimentação

- pH;
- dureza;
- teor de oxigênio dissolvido;
- teor de ferro e cobre.

3.2 - Água da Caldeira

- pH
- fosfato
- condutividade

3.3 - Água de Condensado

- pH
- dureza
- condutividade
- teor de ferro e cobre

Conclusão

Desde o aperfeiçoamento da primeira caldeira a vapor por James Watt, os progressos tecnológicos ocorreram e continuam a ocorrer com velocidade espantosa. Os geradores de vapor se tornam cada vez mais sofisticados e os tratamentos químicos das águas utilizadas em tais sistemas, acompanham o mesmo ritmo de desenvolvimento. Existem muitos tratamentos que podem ser utilizados para resolver um mesmo problema; contudo, a experiência prática, a tecnologia e muitas vezes o bom senso, indicam o melhor caminho a ser seguido. Com uma manutenção preventiva e com o mínimo de cuidados indispensáveis, pode-se obter o máximo proveito útil de um sistema com os mais baixos custos.

Parte 5 - COMBUSTÃO

Introdução

A chamada diferença fundamental entre a Ignição por Centelha (ICE)[4] e a Ignição por Compressão (ICO)[5] nos Motores de Combustão Interna, não comenta sobre o tipo de combustão que ocorre e sobre como o processo é idealizado nos Ciclos Otto e Diesel. O processo de combustão não ocorre em um volume constante (Otto) e nem a pressão constante (Diesel). A diferença entre os dois processos de combustão é que as máquinas de Ignição por Centelha normalmente possuem seus reagentes pré-misturados, enquanto que nas máquinas de Ignição por Compressão, os reagentes são misturados já na combustão.

Com a combustão de reagentes pré-misturados a mistura ar/combustível deve ser sempre estequiométrica (quimicamente correta) para uma ignição e combustão correta. Para o controle da potência de saída a máquina ICE é regulada reduzindo-se a massa de combustível e/ou ar na câmara, reduzindo a eficiência do ciclo. Ao contrário, para máquinas ICO, onde ocorre a injeção do combustível, a mistura somente é estequiométrica na frente de chama. A saída de potência pode então ser controlada pela variação do controle da quantidade de combustível injetado, isto colabora para sua economia de combustível superior.

Nos reagentes pré-misturados, a chama se desloca entre os mesmos, separando reagentes dos produtos da combustão. Têm-se um exemplo de combustão com reagentes pré-misturados num equipamento de oxi-acetileno; para soldagem, a chama é rica em combustível para prever a oxidação do metal, enquanto, para o corte do metal, a chama é rica em oxigênio para fundir o mesmo.

Na chama de difusão, a chama ocorre na interface entre o combustível e o comburente. Os produtos da combustão dispersam-se no comburente, e o comburente se dispersa completamente no produto. Processo similar ocorre no lado do combustível na chama. A velocidade de combustão é controlada pela difusão. Um exemplo comum de uma chama de difusão é a vela. O combustível é fundido e evaporado pela radiação provinda da chama, e então oxidada pelo ar; o processo é claramente governado pela difusão, pois os reagentes não estão pré-misturados.

O Bico de Bunsen, apresentado na figura 01, possui uma chama pré-misturada e uma chama de difusão. O ar que entra pela base do queimador não é suficiente para completar a combustão com uma simples chama pré-misturada. Conseqüentemente, uma segunda frente de chama é estabelecida na interface onde o ar está se misturando no combustível não queimado.

---

[4] Spark Ignition - SI

[5] Compression Ignition - CI

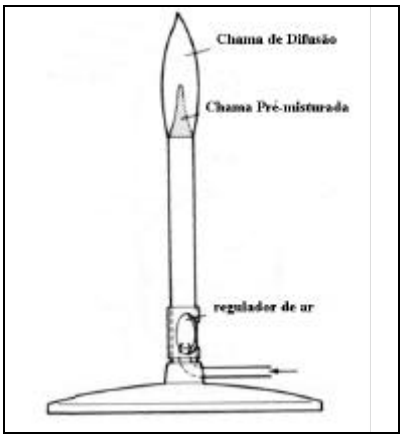


Figura 01 - Bico de Bunsen

A física e a química da combustão foi descrita com alguns detalhes por Gaydon e Wolfhard[6] (1979) e Lewis e von Elbe[7] (1961), mas nenhum livro devota muita atenção para a combustão em um MCI. Misturas de ar/hidrocarbonetos tem velocidade laminar de queima máxima por volta de 0,5 m/s, uma exceção notável deve ser observada na mistura ar/acetileno com um valor de 1,58 m/s.

Um cálculo aproximado do tempo de queima da mistura em um cilindro de 10 mm de diâmetro com ignição central é de aproximadamente 100 ms. No entanto, para uma MCI trabalhando a 3000 rpm o tempo de combustão pode durar apenas 10 ms. Isto mostra a importância da turbulência na velocidade de combustão para o menor tempo.

A turbulência é gerada como resultado dos processos de admissão e compressão e da geometria da câmara de combustão. Em adição a isto pode-se gerar um movimento de ar como uma espiral, sendo particularmente importante em motores Diesel. Isto é obtido com a componente tangencial da velocidade do ar durante a admissão, figura 02.

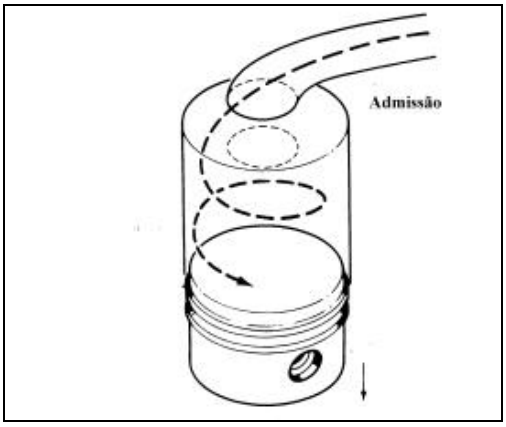


Figura 02 - Espiral gerada
com a Admissão

[6] Gaydon A. G. & Wolfhard H. G. *Flames, their Structure, Radiation and Temperature*, 4th edn, Chapman and Hall, London.

[7] Lewis B. and von Elbe G. *Combustion Flames and Explosions of Gases*, 2nd edn, Academic Press, New York.

Para a combustão com reagentes pré-misturados, o efeito da turbulência está na fragmentação ou na curvatura da frente da chama. Ali podem-se ter pacotes de gases queimados dentro do gás não queimado e vice-versa. Isto aumenta a área frontal da chama e a velocidade da combustão. A figura 03 apresenta uma comparação entre a frente da chama laminar e turbulenta.

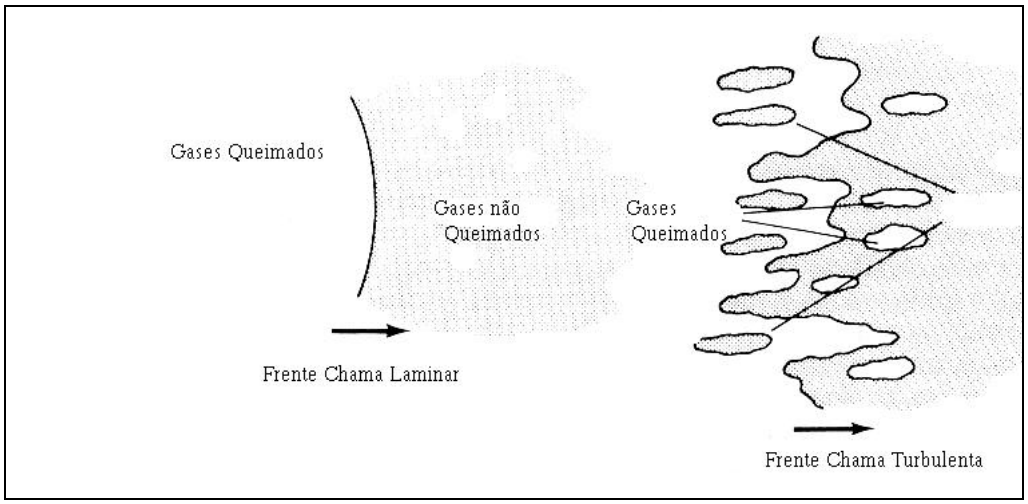


Figura 03 - Comparação entre frentes laminares e turbulentas para combustão com reagentes pré-misturados.

Para a combustão por difusão controlada, a turbulência também aumenta a velocidade da queima. O combustível é injetado como um fino "spray" atomizado, junto ao ar que está quente o suficiente para vaporizá-lo e produzir a queima das gotículas de combustível, figura 04.

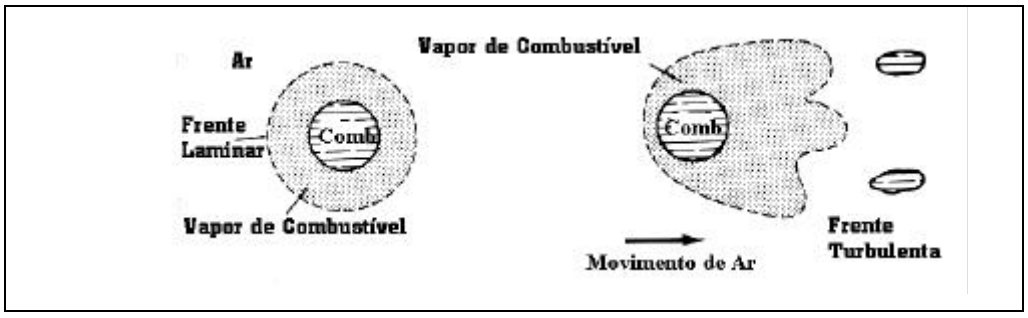


Figura 04 - Comparação entre uma frente laminar com ar parado e uma frente turbulenta com movimentação de ar para combustão de difusão controlada.

Sensíveis economias podem ser conseguidas apenas com pequenos ajustes necessários para que os equipamentos operem adequadamente do ponto de vista do controle da combustão. Entre tantos parâmetros a serem controlados, podem ser citados, a título de exemplo, as condições de nebulização do combustível e a relação ar/combustível. Esses parâmetros, no entanto, muitas vezes não são "visíveis", nem intuitivos. Mesmo um operador experimentado dificilmente conseguirá, pela observação da chama, distinguir condições de operação em que os excessos de ar sejam 30 e 60% respectivamente.

Durante a combustão coexistem fenômenos químicos, térmicos e aerodinâmicos, para a interpretação dos quais são propostos vários modelos, sem que haja uma completa e rigorosa definição dos processos intermediários envolvidos. Não obstante, o levantamento e a interpretação de determinados parâmetros que estejam a ela relacionados, direta ou indiretamente, permitem o estabelecimento de melhores condições de operação dos equipamentos onde se esteja processando a combustão.

Reações de combustão e Estequiometria

De maneira geral, define-se combustão como uma reação química entre duas substâncias ditas combustível e comburente, ocorrendo a alta velocidade e alta temperatura, onde se dá uma intensa liberação de calor com a emissão simultânea de luz, na maioria das vezes, dependendo, entre outros fatores, do tipo de combustível.

Normalmente, o comburente utilizado é o oxigênio do ar atmosférico, por outro lado, os combustíveis se inserem numa faixa de tipos e qualidades, muito embora possa ser dito que a maioria daqueles utilizados industrialmente têm em sua composição, entre outros elementos, o carbono, o hidrogênio e o enxofre.

Na prática, costuma-se fazer uma distinção entre duas formas básicas de reação de combustão. Diz-se que a combustão é completa quando o combustível queima em sua totalidade, ou seja, os reagentes são levados ao seu grau de oxidação máxima. As principais reações existentes, nesse caso, são os seguintes:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + Q_1$$

$$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O + Q_2$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + Q_3$$

Nas reações anteriores, Q_1, Q_2, Q_3 representam as “quantidades de calor” liberadas em cada uma das rações.

Além das reações acima, duas merecem ser destacadas. A primeira delas é a que leva à formação de CO:

$$C + 1/2\ O_2 \rightarrow CO + Q_4$$

É importante observar que, desde que sejam adotadas as mesmas condições de temperatura e pressão na qual ocorram as reações, então a “quantidade de calor” Q_4 é menor que a quantidade Q_1, e portanto *a combustão incompleta é um processo menos eficiente que a combustão completa*, quando o que se procura é a liberação de calor.

Outra reação é a que leva à formação de SO_3:

$$SO_2 + ½\ O_2 \rightarrow SO_3 + Q_5$$

A quantidade de SO_3 formado, na maioria das vezes, é pequena. O grande problema é que essa substância, reagindo com o vapor d'água, forma ácido sulfúrico gasoso, o qual pode condensar dependendo das condições de temperatura dos gases. Nesse caso, existem todos os inconvenientes da corrosão provocada pela deposição da substância ácida em paredes.

A condensação do ácido sulfúrico é um fenômeno que deve ser cuidadosamente analisado, quando se pensa em instalar um recuperador de calor na chaminé de um equipamento.

Para cálculos práticos, pode-se admitir que no máximo 3% de SO_2 se transforma em SO_3. Assim, admitindo um excesso de ar de 30%, a temperatura de condensação do ácido sulfúrico, para os gases de combustão de óleo BPF (4% de enxofre), será da ordem de 120ºC (ver figura b.1), no caso do óleo BTE(0,9% de enxofre) de 90ºC. Esses valores são válidos para pressão total da ordem de $1{,}013.10^5$ Pa (760mmHg).

Dessa forma, quando se quer evitar a corrosão da chaminé, é conveniente manter a temperatura dos gases 40 ou 50ºC acima do ponto de orvalho.

Para se utilizar o monograma da figura 1, calcula-se:

$$\%SO_3(\text{base seca}) = \frac{\text{numero de moles de } SO_3 \text{ nos gases}}{\text{numero total de moles de gases secos}}$$

$$P_{\text{parcial}} \text{ do vapor d'água} = \frac{\text{numero de moles da agua}}{\text{numero total de moles}} \bullet P_{\text{total}} \text{ dos gases}$$

Poder calorífico

A cada uma das reações elementares de combustão completa está associada uma quantidade de calor liberada característica, denominada calor de reação. Em geral, para os combustíveis industriais, costuma-se determinar, experimentalmente, a quantidade de calor liberada (poder calorífico) por uma amostra, mediante a realização de ensaio em laboratório, sob condições padronizadas.

É importante definir-se claramente o poder calorífico, para que se possa estabelecer uma terminologia comum entre a entidade que ensaia o combustível e aquela que vai se utilizar do resultado.

Mais explicitamente, entende-se por *poder calorífico de um combustível o calor liberado durante a combustão completa de um quilograma do mesmo* (no caso de combustíveis sólidos e líquidos), *ou de um normal metro cúbico* (no caso de combustíveis gasosos).

Os combustíveis normalmente utilizados contêm hidrogênio e muitas vezes umidade. Durante a combustão, a água produzida pela oxidação do hidrogênio, acrescida da umidade do combustível, passa a fazer parte dos produtos de combustão. Se durante o ensaio *as condições são tais que esta água se condensa, o calor liberado durante a combustão, e assim medido, denomina-se poder calorífico superior (PCS). Caso não se considere a possibilidade de condensação, ter-se-á o poder calorífico inferior (PCI).*

Além disso, é preciso estabelecer condições padronizadas de pressão e temperatura, nas quais o ensaio é realizado ou o resultado é apresentado. Normalmente, adota-se a pressão de 1 atm e temperatura de 20ºC como condições padrão para os reagentes e os produtos após a combustão, e nesse caso o poder calorífico é dito à pressão constante.

O valor fornecido pelos ensaios usuais é o PCS, sendo que o PCI pode ser determinado, analiticamente, a partir do PCS e da composição elementar do combustível. Essa fórmula é apresentada na tabela B.6.

Os poderes caloríficos podem ainda ser determinados através de fórmulas empíricas, que levam em conta a composição elementar do combustível, desde que se conheçam as entalpias de reação de cada uma das reações dos elementos anteriormente vistas. No entanto, usando tal procedimento, pode-se chegar a erros consideráveis em certos casos.

A tabela B.1 apresenta o poder calorífico superior e inferior de alguns combustíveis sólidos e líquidos, bem como suas composições elementares.

A tabela B.2 apresenta parâmetros análogos para gases pobres típicos, obtidos pela gaseificação de carvão vegetal e madeira. Nesse caso, são fornecidas as composições volumétricas dos gases secos, em termos, de componentes básicos. São apresentados também os poderes caloríficos dos gases secos, valores calculados e não obtidos por ensaio.

TABELA B.1
Composição elementar e poder calorífico aproximados de alguns combustíveis sólidos e líquidos

Comb.	Óleo a (BPF) (a)	Óleo C (OC-4) (a)	Óleo D (BTE) (a)	Óleo E (a)	Óleo Diesel (b)	Querosene (b)	Carvão Min. (c)	Carvão Min. (c)	Lenha Seca (d)
COMPONENTES	C(%)	84,8	85,4	87,4	85,6	86,0	85,6	41,5	52,3	50,2
	H(%)	11,1	12,3	11,8	10,4	13,1	14,3	3,1	3,7	6,3
	O(%)	---	---	---	---	---	---	8,4	9,6	43,1
	S(%)	4,0	2,3	0,7	4,0	0,9	0,1	1,2	0,5	---
	N(%)	---	---	---	---	---	---	0,8	0,9	0,06
	H_2O(%)	traços	traços	traços	---	---	---	base seca	base seca	base seca
	Cinzas(%)	traços	---	traços	---	---	---	45,0	32,5	0,38
PCS	(kJ/kg)	41,940	44,330	43,870	42,070	45,460	46,510	16,700	21,120	15,910
	(kcal/kg)	(10,020)	(10,590)	(10,480)	(10,050)	(10,860)	(11,110)	(3,990)	(5,045)	(3,800)
PCI	(kJ/kg)	39,470	41,610	41,270	39,770	42,570	43,370	16,020	20,300	14,530
	(kcal/kg)	(9,430)	(9,940)	(9,860)	(9,500)	(10,170)	(10,360)	(3,827)	(4,850)	(3,470)

(a) Valores fornecidos pela Shell Brasil S.A. (Petróleo), obtidos dos certificados de qualidade da refinaria "Relan". Anos de 1977.**(b)** Teores de carbono e hidrogênio, bem como os poderes caloríficos, estimados a partir dos teores de enxofre e densidade médios, obtidos junto a Shell Brasil S.A. (Petróleo), para óleos provenientes da refinaria "Relan". **(c)** Fonte: (2). **(d)** Fonte: (3)

TABELA B.2

Composição volumétrica e poderes caloríficos de

gases pobres secos

Combustível		Gás de carvão Vegetal (a)	Gás de Madeira (b)
Composição volumétrica dos gases secos (%)	CO_2	7,9	8,5
	O_2	0,3	0,3
	CO	29,7	28,1
	CH_4	0,5	0,8
	H_2	13,8	13,6
	N_2	47,8	48,6
PCS dos gases secos (kJ/kg)		5690	5610
(PCS em kcal/kg)		(1360)	(1340)
PCI dos gases secos (kJ/kg)		5400	5320
(PCI em kcal/kg)		(1290)	(1270)

(a) Valores médios obtidos em ensaios realizados em gaseificador instalado no IPT. O gaseificador é do tipo leito fixo descendente com fluxo em contracorrente, tendo ar e vapor d'água como agente gaseificantes.

(b) Valores médios obtidos em ensaios realizados pelo IPT, em gaseificador instalado em indústria particular. O gaseificador é do tipo leito fixo descendente, com fluxos em contracorrentes, tendo ar e vapor d'água como agentes gaseificantes.

Estequiometria da combustão

Quando o oxigênio consumido é o necessário e suficiente para queimar completamente os elementos combustíveis, diz-se que a reação é estequiométrica. Quando a quantidade de oxigênio é maior, fala-se em excesso de oxigênio; em caso contrário, fala-se em falta de oxigênio, situação na qual não se realiza a combustão completa, podendo formar-se CO e até partículas de carbono, estas últimas constituindo o que se denomina fuligem.

Como usualmente o oxigênio é retirado do ar atmosférico, fala-se em excesso de ar ou falta de ar, sendo este constituído basicamente de oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2), na proporção indicada na Tabela B.3.

Tabela B.3

Composição aproximada do ar atmosférico seco[(a)]

	Volume (%)	Massa(%)
Nitrogênio	79	77
Oxigênio	21	23
Densidade	1,293kg/Nm$^{3(b)}$	

(a) O ar atmosférico carrega consigo uma dada quantidade de unidade, que depende das condições atmosféricas, e é determinável através de consulta à carta psicrométrica; na falta de melhores dados, pode-se adotar a umidade ω=0,010 kg de vapor d'água/kg ar seco que representa um valor médio para a cidade de São Paulo.

(b) *O normal metro cúbico (Nm^3) identifica uma massa de gás com volume medido de 1 m^3*, estando este nas condições normais de temperatura e pressão, ou seja, temperatura absoluta de 273,16 K (0ºC) e pressão absoluta de 1,013x10^5 Pa (760mmHg). Para se determinar o volume da massa de gás em outras condições, deve-se aplicar:

V=370,84T/p: onde T = temperatura absoluta do ar em Kelvin (K) e, P = pressão absoluta do ar em Pascal(Pa).

Assim, para cada 4,76 unidades de volume de ar consumidos na combustão, apenas uma (21% de oxigênio) realmente participa das reações sendo as restantes 3,76 constituídas de nitrogênio. Esse gás, por sua vez, sendo inerte, apenas contribui para abaixar a temperatura de chama na combustão.

A partir das reações básicas de combustão, é possível determinar a quantidade de ar consumido, bem como a quantidade de gases gerados, em massa e em volume.

Na tabela B.4 são consideradas as equações básicas para uma queima completa e estequiométrica do carbono, do hidrogênio e do enxofre.

TABELA B.4 Equações básicas de combustão		
$C + O_2$	$\rightarrow$	CO_2
12kg	33kg	44kg
12kg	$22,4Nm^3$	$22,4Nm^3$
Ar de combustão seco: $22,4/12 . 4,76 = 8,88Nm^3$/kg de C ou 8,88.1,293 = 11,48kg/kg de C		
$H_2 + 1/2O_2$	$\rightarrow$	H_2O
2kg	16kg	18kg
2kg	$11,2Nm^3$	$22,4Nm^3$
Ar de combustão seco: $11,2/2 . 4,76 = 26,7\ Nm^3$/kg de H_2 ou 26,7 . 1,293 = 34,52 kg/kg de H_2		
$S + O_2$	$\rightarrow$	SO_2
32 kg	32kg	64 kg
32 kg	$22,4Nm^3$	$22,4\ Nm^3$
Ar de combustão seco: $22,4/32 . 4,76 = 3,33\ Nm^3$/kg de S ou 3,33 . 1,293 = 4,31 kg/kg de S		

Conhecendo-se então, os coeficientes assinalados na tabela B.4 e a composição elementar do combustível, é possível obter a quantidade de ar necessária para sua estequiométrica.

Na tabela B.5 são apresentados alguns valores de referência de massas de ar estequiométrica para alguns combustíveis.

TABELA B.5

Ar e gases de combustão para queima estequiométrica

	AR DE COMBUSTÃO[a]		GASES DE COMBUSTÃO[b]	
	kg/kg de combustível	Nm^3/kg de combustível	kg/kg de comb.	Nm^3/kg de comb.
Óleo A(BPF)	13,8	10,8	14,8	11,4
Óleo C(OC-4)	14,3	11,1	15,3	11,8
Óleo D(BTE)	14,3	11,1	15,3	11,8
Óleo E	13,7	10,7	14,7	11,3
Óleo Diesel	14,6	11,4	15,6	12,1
Querosene	14,9	11,6	15,9	12,4
Gás de nafta	7,6	6,0	8,6	7,0
Gás pobre de carvão vegetal (vide tabela B.2)	1,2	0,95	2,2	1,6
Propano	15,8	12,3	16,8	13,3
GLP	15,7	12,2	16,7	13,2
Lenha seca (vide tabela B.1)	6,1	4,8	7,1	5,4
Carvão Mineral com 32,5% de cinzas (vide tabela B.1)	7,0	5,4	7,6	5,7

(a) Ar atmosférico úmido com umidade ω=0,010kg de vapor d'água/kg de ar seco.

(b) Gases de combustão úmidos.

Na maioria das vezes, no entanto, a combustão se processa com excesso de ar. Define-se então, o coeficiente de excesso de ar (c) como sendo:

$$c = \frac{\text{massa de ar utilizado - massa de ar estequiometrico}}{\text{massa de ar estequiometrico}}$$

É útil a apresentação de algumas fórmulas que permitam o cálculo dos parâmetros anteriormente fornecidos, desde que se saiba a composição elementar do combustível.

Considere-se o caso geral de um combustível qualquer, do qual é conhecida a composição em massa:

c: kg de carbono por kg de combustível

h: kg de hidrogênio por kg de combustível

o: kg de oxigênio por kg de combustível

a: kg de água (umidade) por kg de combustível

s: kg de enxofre por kg de combustível

n: kg de nitrogênio por kg de combustível

Admitindo-se a combustão completa, a tabela B.6 permite a determinação de vários parâmetros importantes.

Os conceitos anteriormente vistos, são importantes na medida em que possibilitam a execução dos procedimentos a seguir apresentados:

a) Balanços energéticos: as quantidades de ar de combustão e de gases gerados são utilizados para a obtenção do balanço de massa, bem como do balanço energético, sem os quais é praticamente impossível a otimização do modo de operação do equipamento estudado.

b) Dimensionamento de exaustores e trocadores (recuperadores) de calor, que tem no conhecimento da vazão de gases um parâmetro importante de projeto.

c) Análise de gases: com base no estudo das reações químicas é possível, tendo a composição do combustível, avaliar a composição volumétrica dos gases de combustão, seja esta estequiométrica, com falta ou excesso de ar. Em sentido inverso, a análise da composição dos produtos de combustão permite determinar como se deu a combustão, primeiro passo para a atuação nas variáveis que a influenciam.

TABELA B.6 Parâmetros de combustão		
PARÂMETRO	SÍMBOLO	FÓRMULA[a]
Massa de O_2 necessária à combustão estequiométrica	m_{O_2}	$m_{O_2} = 32\left(\frac{c}{12}+\frac{h}{4}+\frac{s}{32}-\frac{o}{32}\right)$
Massa de ar atmosférico seco necessária à combustão estequiométrica	$m_{ar\ seco}$	$m_{ar\ seco}=137{,}9\left(\frac{c}{12}+\frac{h}{4}+\frac{s}{32}-\frac{o}{32}\right)$
Volume correspondente à massa acima	$V_{ar\ seco}$	$V_{ar\ seco}=106{,}6\left(\frac{c}{12}+\frac{h}{4}+\frac{s}{32}-\frac{o}{32}\right)$
Massa de ar atmosférico úmido necessária à combustão estequiométrica	m_{ar}	$m_{ar}=m_{ar\ seco}(1+\omega)$
Volume correspondente à massa acima	V_{ar}	$V_{ar}=V_{ar\ seco} + m_{ar\ seco.}\ \omega.1{,}244$
Massa de CO_2 formado, proveniente da combustão completa[b]	m_{co_2}	$m_{co_2}=3{,}67C$
Volume correspondente à massa acima	V_{co_2}	$V_{co_2}=1{,}867c=m_{co_2}.0{,}509$
Massa de H_2O formado, proveniente da combustão completa[c]	m_{H_2O}	$m_{H_2O}=9h+a+m_{ar\ seco.}\ \omega(1+e)$
Volume correspondente à massa acima	V_{H_2O}	$V_{H_2O}=11{,}2h+1{,}244(a+m_{ar\ seco.}\ \omega)=m_{H_2O}.1{,}244$
Massa de SO_2 formado, proveniente da combustão completa[b]	m_{so_2}	$m_{so_2}=2S$
Volume correspondente à massa acima	V_{so_2}	$V_{so_2}=0{,}7s=m_{so_2}.0{,}35$
Massa total de gases secos, provenientes da combustão estequiométrica	m_{gs}	$m_{gs} = 3{,}67c + 2s + n + 105{,}3\left(\frac{c}{12}+\frac{h}{4}+\frac{s}{32}-\frac{o}{32}\right)$

TABELA B.6 Parâmetros de combustão (continuação)		
PARÂMETRO	SÍMBOLO	FÓRMULA[(a)]
Volume correspondente à massa acima	V_{gs}	$V_{gs}=\left\{\frac{c}{12}+\frac{s}{32}+3{,}76.\left(\frac{c}{12}+\frac{h}{4}+\frac{s}{32}-\frac{o}{32}\right)+\frac{n}{28}\right\}.22{,}4$
Massa total de gases de combustão úmidos, provenientes da combustão estequiométrica	m_{gu}	$m_{gu}=m_{gs}+9h+a+m_{ar\ seco}.\omega$
Volume correspondente à massa acima	V_{gu}	$V_{gu}=V_{gs}+11{,}2h+1{,}244(a+m_{ar\ seco}.\omega)$
Massa de gases de combustão secos, provenientes da combustão completa com excesso de ar	$m_{gs'}$	$m_{gs'}=m_{gs}+m_{ar\ seco}.e$
Volume correspondente à massa acima	$V_{gs'}$	$V_{gs'}=V_{gs}+V_{ar}.e$
Massa de gases de combustão úmidos, provenientes da combustão completa com excesso de ar	$m_{gu'}$	$m_{gu'}=m_{gu}+m_{ar}.e$
Volume correspondente à massa acima	$V_{gu'}$	$V_{gu'}=V_{gu}+V_{ar}.e$
Determinação do PCI a partir do PCS	PCI	PCI=PCS-(9H+a).2,454 (d)

(a) Para as massas, as unidades são kg/kg de combustível. Para os volumes, são Nm^3/kg de combustível. **(b)** Independe do excesso de ar. **(c)** Com excesso de ar. **(d)**PCS e PCI em kJ/kg de combustível a 20ºC e 1 atm.

Excesso de ar

O excesso de ar muito alto, abaixando a temperatura de chama, diminui sensivelmente a troca de calor por radiação, diminuindo a eficiência dos equipamentos. Essa é a razão pela qual o excesso de ar sempre que possível, deve ser mantido em níveis mínimos, compatíveis com a exigência de combustão completa.

Uma exceção deve ser feita àqueles equipamentos onde, ou por razões de processo, ou por razões de material, deve ser admitida uma quantidade razoável de excesso de ar, de forma a se diminuir a temperatura de chama, ou dos produtos na câmara de combustão.

Nos casos onde se deseja minimizar o excesso de ar, a análise dos produtos de combustão reveste-se de singular importância, já que, como foi visto anteriormente, pode fornecer a qualidade da combustão. Dos aparelhos utilizados para tal fim, o mais conhecido é o analisador Orsat, que permite determinar a composição volumétrica dos gases secos, fornecendo os teores de CO_2, CO, O_2, SO_2 e N_2.

No entanto, quando a temperatura dos gases de chaminé é relativamente baixa (abaixo de cerca de 500°C), verifica-se, experimentalmente, que os teores de CO são mínimos, desde que não haja a formação de fuligem. Essa última condição (aparecimento de fuligem) é de fácil constatação visual é, normalmente, prontamente corrigida pelo operador. Nesses casos, portanto não se costuma verificar o teor de CO, sendo determinado apenas o teor de CO_2 ou de O_2.

A determinação do teor de CO_2, presente nos gases de chaminé, é mais simples e, portanto, mais usual.

A verificação exata do grau de emissão de fuligem pode também ser feita mediante a utilização de instrumentação simples. Existem escalas de índice de fuligem (por exemplo Bacharach e Ringelman) que permitem a comparação com a amostra coletada.

Admitida a combustão completa, a porcentagem de CO_2 dos gases secos pode ser relacionada com o excesso de ar, mediante a utilização das fórmulas abaixo:

$$e = \frac{\frac{100c}{12.(\%CO_2)} + \frac{h}{4} - \frac{n}{28} - \frac{o}{32}}{4{,}76\left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32}\right)} - 1$$

ou medindo-se a porcentagem de O_2, e desprezando o SO_2 e CO:

$$e = \frac{3{,}76.\%O_2}{1 - \%CO_2 - 4{,}76.\%O_2}$$

onde: e= coeficiente de excesso de ar

$\%CO_2$= porcentagem volumétrica de CO_2 nos gases de combustão secos

$\%O_2$= porcentagem volumétrica de O_2 nos gases de combustão secos

c, h, n, s e o = frações em massa dos vários constituintes do combustível, conforme definido anteriormente.

Uma outra fórmula mais simples, porém aproximada, é a seguinte:

$$e = \frac{(\%CO_2)max}{(\%CO_2)} - 1$$

onde: $(\%CO_2)_{máx}$= máxima porcentagem volumétrica de CO_2 possível nos gases secos, para o combustível utilizado (combustão estequiométrica).

O parâmetro $(\%CO_2)_{máx}$ encontra-se apresentado na tabela B.7 para vários combustíveis.

TABELA B.7 Porcentagem volumétrica básica de CO_2 nos produtos de combustão secos de alguns combustíveis	
COMBUSTÍVEL	$(\%CO_2)_{máx}$
Óleo A (BFP)	15,8
Óleo C (OC-4)	15,5
Óleo D (BTE)	15,9
Óleo E	16,1
Óleo Diesel	15,4
Gás de nafta	14,5
Propano	13,8
GLP	13,9
Gás pobre de carvão vegetal (vide tabela B.2)	22,4
Lenha seca (vide tabela B.1)	20,1
Carvão mineral com 32,5% de cinzas (vide tabela B.1)	18,8

Uma outra forma prática ainda, para o relacionamento do excesso de ar com o teor de CO_2 (ou O_2), é a utilização do monograma da figura B.2.

Ainda merecem ser citados os diagramas de Ostwald, que relacionam os teores de CO_2, CO, O_2 e excesso de ar para um dado combustível. A figura B.3 mostra um desses diagramas, válido para óleos combustíveis pesados.

Finalmente, com base no excesso de ar calculado nas diferentes formas e na massa de ar para combustão estequiométrica, indicada na tabela, pode-se também calcular a massa de gases de chaminé pela expressão: $M_g=M_0[1+\beta\ (1+e)]$

onde: e= excesso de ar

β= massa de ar para queima estequiométrica de 1kg de combustível.

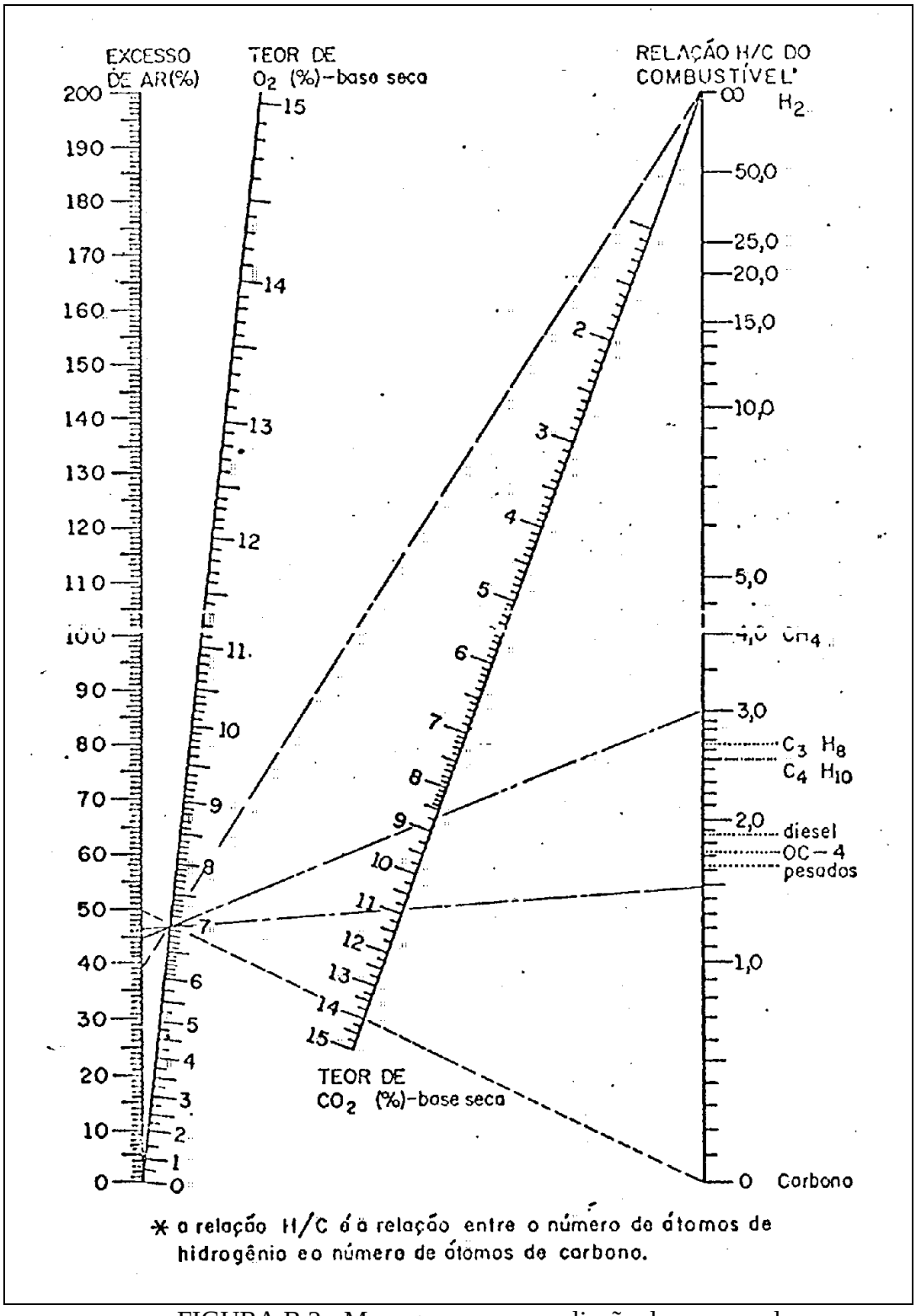


FIGURA B.2 - Monograma para avaliação do excesso de ar

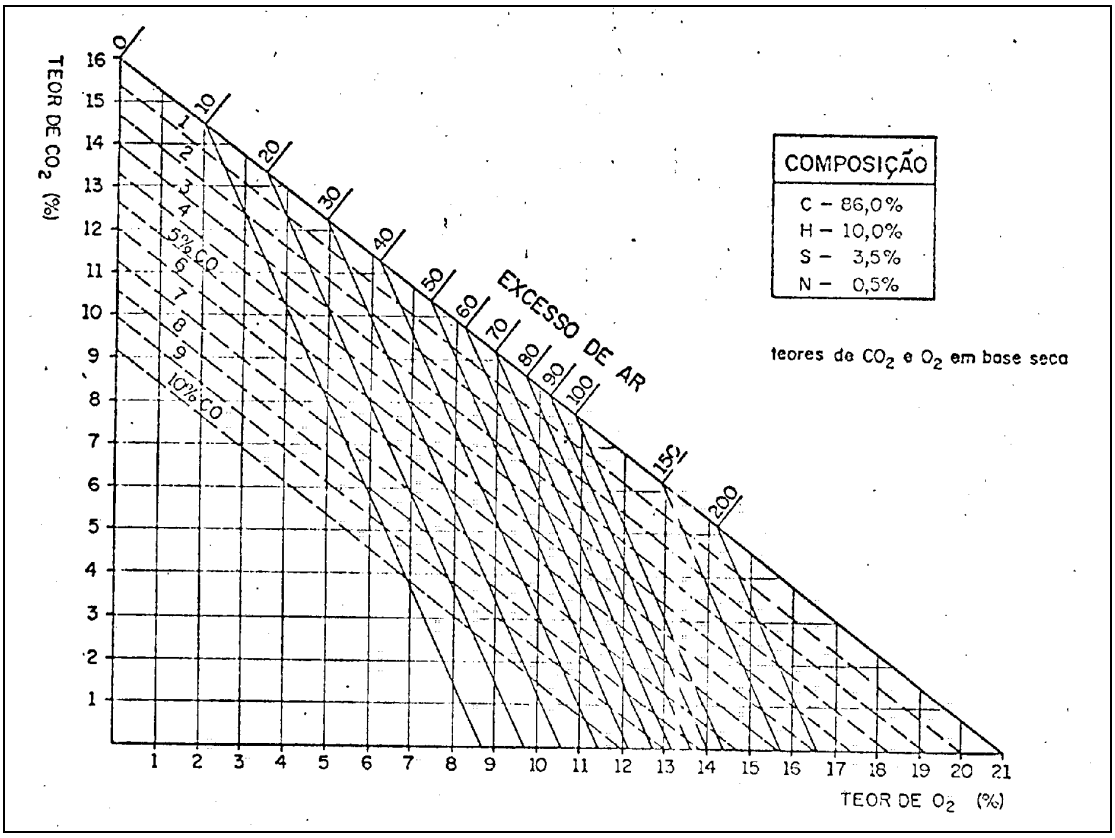


FIGURA B.3 - Diagrama de Ostwald para óleo combustível

Modelos de combustão

Até agora, a combustão foi apresentada apenas do ponto de vista de reagentes e produtos. Surge, quase que naturalmente, a indagação acerca dos processos que comandam a transformação dos reagentes nos produtos, durante a reação de combustão. São apresentados, a seguir, os modelos para a combustão de combustíveis líquidos, gasosos e sólidos.

Combustíveis líquidos

Pretende-se aqui apresentar um modelo que mais se aplique à combustão de óleos combustíveis.

O elemento fundamental no processo de preparação da mistura ar-combustível é o queimador. O óleo combustível, penetrando no queimador, é nebulizado por meio pressão do próprio óleo, ar de nebulização (ar primário) ou vapor. A nebulização nada mais é do que a transformação do fluxo líquido contínuo em gotas de pequeno diâmetro.

Essas gotas são misturadas ao ar de combustão (ar secundário) mediante um intenso turbilhonamento no ar provocado pelo bocal do queimador.

As gotículas, recebendo então a irradiação da pedra refratária, além da própria chama que se forma à frente, têm as suas frações mais leves destiladas, ou seja, essas frações passam ao estado de vapor. Atingindo as regiões de temperaturas mais elevadas, esses vapores combustíveis se inflamam, ocorrendo, simultaneamente, dentro da gota, um processo em que

as cadeias carbônicas longas são quebradas (“craking”) em cadeias menores, propiciando a destilação de novas frações combustíveis leves. Esse processo implica, concomitantemente, a transformação das gotas em núcleos de alto conteúdo carbônico, de combustão mais lenta, que exigem altas temperaturas e contato constante com o oxigênio, caso contrário, pode dar origem à formação de fuligem nos gases efluentes, que, além de representar uma perda, pode inclusive se depositar em superfícies no interior do equipamento.

Quanto maior for a eficiência de nebulização, ou seja, quanto menor for o diâmetro médio das gotículas formadas, maior será a área de contato total entre o combustível e o ar, e maior será a taxa de destilação. Conseqüentemente, o processo de combustão total é acelerado, e os núcleos de alto conteúdo carbônico são formados, antes que as regiões mais frias da câmara de combustão sejam atingidas, condição indesejável como já visto.

Conclui-se, portanto, que existem quatro parâmetros muito importantes na combustão de óleos combustíveis: quantidade de ar de combustão, eficiência de mistura combustível-ar, temperatura e tempo de permanência.

Quantidade de ar de combustão

Muito embora, numa análise preliminar, possa ser imaginado utilizar apenas a quantidade de ar estequiométrico, na prática faz-se necessária a utilização de uma certa quantidade de ar em excesso, de tal forma que se garanta a combustão completa.

No entanto, se por esse lado o excesso de ar contribui beneficamente para a qualidade da combustão, por outro lado, a partir de certos limites, ele provoca o abaixamento da temperatura de chama, que, como foi visto anteriormente, pode ser prejudicial na maioria dos equipamentos, por diminuir as taxas de troca de calor.

Muitas vezes, existe a necessidade de abaixamento da temperatura de chama por limitações impostas pelos materiais existentes ou pelos processos, caso em que se utiliza propositadamente um grande excesso de ar. Quando tal limitação não for existente, o excesso de ar deve ser mantido em níveis mínimos, compatíveis com a exigência de combustão completa.

Esses valores mínimos de excesso de ar dependem, entre outros fatores, do tipo de queimador, do mecanismo, de nebulização, do tipo de combustível, da temperatura na qual o combustível é nebulizado, da câmara de combustão, se o ar é pré-aquecido ou não, etc.

Em caldeiras flamotubulares compactas consegue-se operar adequadamente com excessos de ar que variam, normalmente, entre 10 e 30% (0, 10 < e < 0,30).

Eficiência de mistura combustível - ar

Como foi visto anteriormente, tanto mais rápida e eficiente será a combustão quanto maior for a área de contato entre o combustível e o ar. Isso é conseguido mediante uma nebulização eficiente, bem como uma mistura adequada com o ar de combustão.

Algumas providências podem contribuir para a consecução dos objetivos acima e são comentados a seguir.

- Manutenção periódica dos queimadores: que consiste basicamente na sua limpeza regular.

- Manuseio adequado do óleo combustível: em primeiro lugar deve-se garantir a pureza do óleo, através da eliminação de sólidos, água, etc. No caso de óleos combustíveis pesados (BPF, BTE, E), devido à sua alta viscosidade, torna-se necessário o seu pré-aquecimento a temperaturas adequadas, sem o que a nebulização será deficiente. Nesse caso específico, as temperaturas de pré-aquecimento podem atingir até os valores da ordem de 130ºC. As temperaturas de pré-aquecimento, além de dependerem das características do próprio óleo, dependem também do meio de aquecimento e da taxa de dissipação de calor utilizados. Para altas taxas de aquecimento, podem ocorrer pontos com temperatura elevada provocando a vaporização de frações de combustível. Os óleos exigem para seu aquecimento, por exemplo, taxas de dissipação de calor cerca de quatro vezes menores que aquelas utilizadas para aquecimento de água, caso contrário pode haver a vaporização do óleo nos pontos de aquecimento. Essa vaporização, quando ocorre nos tubos de alimentação, pode provocar instabilidade na chama; em temperaturas mais elevadas pode haver a deposição das frações mais pesadas nos bicos e canais, causando a sua obstrução.

- A nebulização pode ser facilitada, também, pela adição, aos óleos combustíveis, de aditivos dispersantes que reduzem a sua tensão superficial, facilitando a formação de gotas.

- O fornecimento do óleo, do ar de nebulização e do ar de combustão às pressões indicadas pelos fabricantes dos queimadores, devem ser controlados pela leitura dos manômetros, que devem sempre estar em bom estado e calibrados.

- Faixa de operação dos queimadores: a faixa de operação dos queimadores deve ser compatível com sua capacidade. Por exemplo, no caso de caldeiras, esse item está intimamente relacionado com a própria capacidade da caldeira. Nos casos onde estas estão superdimensionadas, o queimador pode atuar numa faixa de consumo onde a nebulização deixa de ser eficiente, diminuindo, conseqüentemente, a eficiência de combustão.

Finalizando, deve-se notar que nebulizações deficientes exigem, normalmente, maiores excessos de ar, com os efeitos já comentados anteriormente.

Temperatura da fornalha

A manutenção de temperaturas elevadas na fornalha, desde que os materiais assim o permitam, favorece os processos de aquecimento, destilação e "craqueamento" das gotas combustíveis, facilitando a ignição e permitindo manter bem aquecidos os núcleos de carbono até a sua queima completa. Dessa forma, acelerando os processos de combustão, pode-se inclusive diminuir os excessos de ar de combustão.

De modo geral, as temperaturas de fornalha são função do combustível, do sistema de queima, do projeto da fornalha, e seu crescimento é favorecido, entre outros fatores:

a) pelo pré-aquecimento do ar de combustão;

b) pela eliminação de cantos e correntes mortas;

c) pela manutenção da pedra refratária em bom estado e irradiando à raiz da chama.

Excessos de ar elevados contribuem, naturalmente, para a diminuição das temperaturas na fornalha.

Tempo de permanência

Concluindo o que foi visto nos itens anteriores, verifica-se que é preciso garantir à gotícula de óleo combustível, um tempo suficiente, nas condições adequadas de nebulização, temperatura e mistura com o ar, para que a combustão se dê eficientemente.

Em suma, existe um compromisso entre a velocidade dos gases, o combustível utilizado, a temperatura, as condições de nebulização e mistura com ar, e o tamanho da fornalha. Em vista de tudo, é importante tomar cuidados especiais ao queimar certos combustíveis em fornalhas projetadas para outros, sob pena de haver grandes perdas.

Combustíveis gasosos

Distintamente dos combustíveis líquidos, a combustão de gases ocorre sem as etapas de nebulização e destilação das gotículas, já que se inicia com o combustível na forma gasosa. Desse modo, sem a ocorrência dessas duas, a combustão pode se desenvolver em tempos menores, câmaras mais frias, temperaturas mais baixas, em condições menos rígidas que as necessárias a combustão de líquidos. Por outro lado, existem particularidades próprias da queima de gases que devem ser tratadas em mais detalhes. Para tal, pode-se fazer uma análise simplificada de um modelo, consistindo em um tubo com uma certa vazão de gás, onde ocorre a combustão em sua extremidade aberta, produzindo uma chama. A combustão aqui é lenta e irregular, e a chama luminosa e instável.

O aspecto da chama muda sensivelmente de forma quando se permite que uma parcela do ar (ar primário) seja pré-misturado ao gás (fig. B.4), antes deste atingir a zona de reação. Nesse caso, a combustão é mais estável e regular, bem como, menos luminosa.

Logo na boca do queimador forma-se um cone azulado, denominado cone de ignição, uma vez que é nessa região que se dá o início da combustão.

Quando o gás combustível utilizado é um hidrocarboneto (ou seja, constituído apenas de carbono e hidrogênio), pode ser comprovado experimentalmente que esta reação primária produz, essencialmente, uma mistura de CO, H_2, CO_2 e H_2O (além do N_2 do ar atmosférico). Esse processo de ignição é favorecido pelo aquecimento devido à irradiação da pedra refratária e da própria chama que se desenvolve adiante.

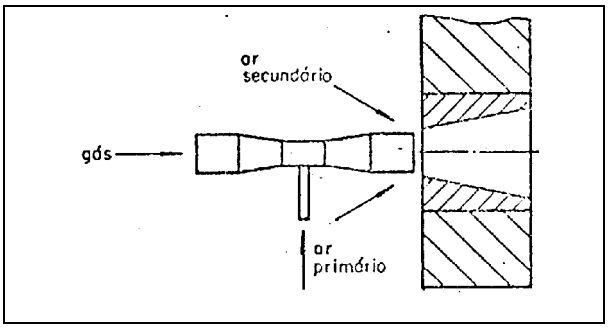


Figura B.4 (Esquema de queimador a gás)

A mistura acima, recebendo o ar atmosférico, forma finalmente CO_2 e H_2O.

A combustão será tanto mais rápido e menos luminosa, quanto maior for a proporção entre o ar primário e o ar secundário.

Os excessos de ar requeridos variam, normalmente, de 5 a 20%, dependendo, entre outros fatores, do gás utilizado, do tipo de queimador, e da eficiência de mistura gás-ar, que é muito importante.

No caso específico de combustíveis gasosos, existem alguns outros parâmetros e propriedades que se revestem de particular importância, quando se estuda o processo de combustão, os quais são enumerados a seguir.

Limite de Inflamabilidade

A combustão de uma mistura de gás combustível-ar só é possível dentro de determinadas proporções, que variam de um gás para outro.

Define-se limite inferior de inflamabilidade, a uma determinada pressão e temperatura, à condição de proporção de combustível na mistura abaixo da qual fica impedido o desenvolvimento da combustão.

O mesmo fenômeno ocorre quando a proporção de combustível está acima de determinado valor, denominado limite superior de inflamabilidade.

A tabela B.8 apresenta essas propriedades para vários gases combustíveis (7).

TABELA B.8				
	Limites de inflamabilidade		Limites de inflamabilidade	
	combustão com ar		combustão com O_2	
Combustível	Inferior	Superior	Inferior	Superior
	Combustível na mistura (%)	Combustível na mistura (%)	Combustível na mistura (%)	Comb. na mistura (%)
Hidrogênio	4,00	75,00	4,65	93,9
Monóxido de Carbono	12,50	74,50	15,50	93,9
Metano	5,00	15,00	5,40	59,2
Etano	3,00	12,50	4,10	50,5
Propano	2,12	9,50	2,3	55
n-Butano	1,86	8,41	1,8	49
CLP(3)	7	21	----	----
Gás de Nafta (COMGÁS)	4	40	----	----
Gás Natural(3)	5	15	----	----

Velocidade de chama

De uma maneira simplificada, a velocidade de chama é a velocidade com que as sucessivas camadas de mistura combustível-ar vão entrando em ignição, estando esta mistura estacionária.

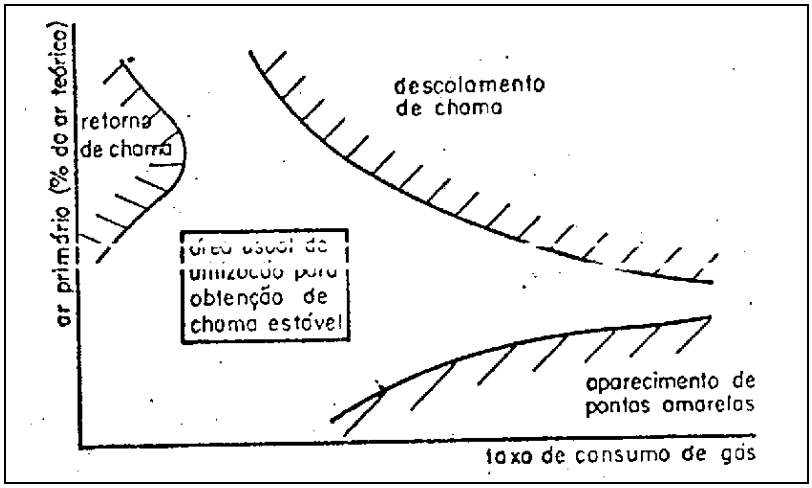
A velocidade de chama, a uma determinada pressão e temperatura, depende da composição da mistura. É máxima para proporções de ar um pouco abaixo da estequiométrica, e nula para composições fora da faixa de inflamabilidade.

A velocidade de chama é importante quando se analisa a estabilidade da chama.

Se, em determinado instante, a velocidade de chama for maior que a velocidade com que a mistura inicial sai do queimador, além de determinados limites, pode ocorrer o chamado "retorno de chama" para dentro do mesmo. Caso contrário, se a velocidade da mistura for superior à velocidade de chama, além de determinados limites, pode ocorrer o "deslocamento de chama" e sua conseqüente extinção.

Quando se vai dimensionar um queimador para uma dada mistura, os fenômenos acima são dos mais importantes.

Se um determinado queimador, utilizando determinado tipo de gás, for ensaiado a níveis de carga, bem como com taxas variáveis de ar primário, serão obtidas curvas do tipo das apresentadas na figura B.5 abaixo, denominadas diagramas de combustão.


ar primário (% do ar teórico)
retorno de chama
descolamento de chama
área usual de utilização para obtenção de chama estável
aparecimento de pontas amarelas
taxa de consumo de gás
Figura B.5 Diagrama de combustão

As velocidades de chama, normalmente, são encontradas indiretamente, a partir do fator “S” de Weaver.

O fator “S” de Weaver é a relação entre a velocidade de chama de um gás e a velocidade máxima de chama do hidrogênio, quando se promove a combustão de cada um deles com o ar[7].

Índice de Wöbbe

O índice de Wöbbe é um número proporcional à quantidade de energia (Q) teoricamente disponível pela queima de determinado gás, à pressão constante.

Considerando-se, então, o escoamento de um gás através de um orifício, pode-se concluir:

$$Q = k.. \frac{PCS\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{d_{rel}}}$$

onde: k = constante

PCS = poder calorífico superior na base volumétrica

Δp = diferencial de pressão entre as secções de montante e jusante de orifício

d_{rel}=densidade relativa do gás em relação ao ar na entrada do orifício (mesmas condições de pressão e temperatura)

Dessa forma, expressa-se o índice de Wöbbe da seguinte forma:

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d_{rel}}}$$

Quando são consideradas situações onde existe a variação do diferencial de pressão, então a expressão deve ser modificada [7], resultando:

$$W' = \frac{PCS\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{d_{rel}}}$$

Combustíveis sólidos

Como modelo básico, para maior facilidade de exposição, será adotada a queima de combustível sólido em uma fornalha de leito fixo, com carga manual, conforme ilustrado na figura B.6.

A descrição a seguir, não se assemelha àquela adotada para combustíveis líquidos, onde procurou-se mostrar os fenômenos que iam se sucedendo ao redor de uma gota de óleo. Pretende-se agora mostrar o processo do ponto de vista macroscópico, sem acompanhar uma partícula sólida ao longo de sua trajetória.

Ao longo da altura do leito, podem ser distinguidas as seguintes regiões:

a) zona de secagem (região 1);

b) zona de pirólise (região 2);

c) zona de redução (região 3);

d) zona de oxidação (região 4);

e) zona de cinzas (região 5).

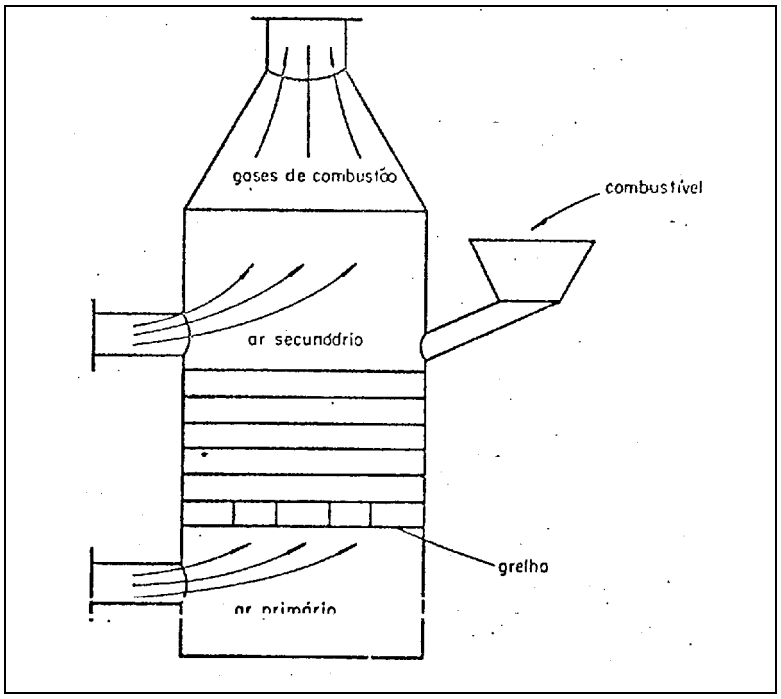


Figura B.6 - Fornalha de leito fixo para combustíveis sólidos

Será acompanhada, ao longo de sua trajetória, o ar primário, e os fenômenos que ocorrem a sua volta.

Inicialmente, entrando na fornalha, o ar primário atravessa a grelha, a zona das cinzas, atingindo a zona de oxidação. As cinzas, apesar de todos os inconvenientes, protegem a grelha contra as altas temperaturas reinantes na região de oxidação.

Na zona de oxidação, as partículas sólidas, com alta concentração de carbono (coque), reagem com o oxigênio do ar primário, produzindo gases que em sua composição possuem, predominantemente, CO_2. Nessa zona, as reações são exotérmicas e atingem temperaturas elevadas.

O CO_2 formado, ao entrar em contato com o coque incandescente e, na falta de oxigênio, totalmente consumido na zona anterior, reage segundo a reação:

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO - Q$$

onde Q representa uma dada quantidade de calor. Como a reação acima é endotérmica, contribui para o abaixamento da temperatura do leito. A região onde prevalece tal reação é denominada zona de redução.

Os gases quentes, agora compostos principalmente por CO, CO_2 (e N_2 do ar primário) atingem então, uma região um pouco mais fria do leito. É nessa região, denominada zona de pirólise, onde são retiradas as frações combustíveis mais leves do sólido, bem como os alcatrões, que são as frações mais pesadas. Em realidade, o processo acima fornece um espectro de substâncias vaporizadas muito amplo, e de difícil quantificação. No estado sólido, após essa fase, o que resta é o coque agregado às cinzas.

Antes de atingir a zona de pirólise, o combustível sólido passa pela zona de secagem, onde se perde grande parte de sua umidade. Naturalmente, a unidade residual vai sendo evaporada nas zonas subseqüentes.

Os gases que deixam o leito são compostos por CO_2, CO, vapor d'água, N_2 e uma série de vapores e gases combustíveis.

A admissão de ar secundário propicia a combustão completa dos produtos combustíveis restantes.

No caso de combustíveis sólidos, pobres em substâncias voláteis, a maior parte do ar deve ser primário; caso contrário, uma grande quantidade de ar secundário deve ser admitida, para a combustão daqueles últimos.

Muito embora o modelo acima proposto tenha sido elaborado para um leito fixo de alimentação manual, a idéia pode ser prontamente extrapolada para o caso de grelha móvel. A figura B.7 ilustra o posicionamento das várias zonas existentes nesse caso.

Para os combustíveis sólidos, podem ser feitas as mesmas observações qualitativas feitas para os combustíveis líquidos em relação à quantidade de ar de combustão, temperatura e tempo de permanência.

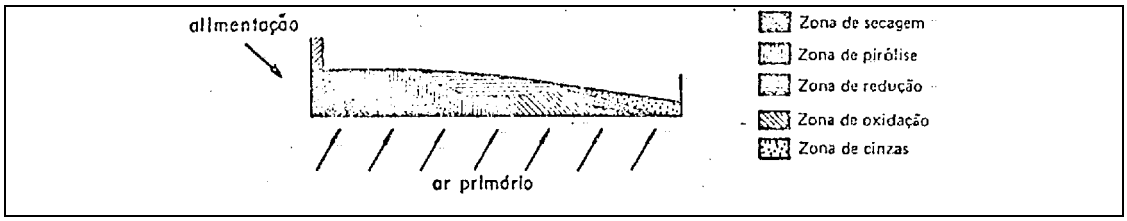


Figura B.7 - Zonas distintas existentes na fase sólida, na queima em grelha móvel (8)

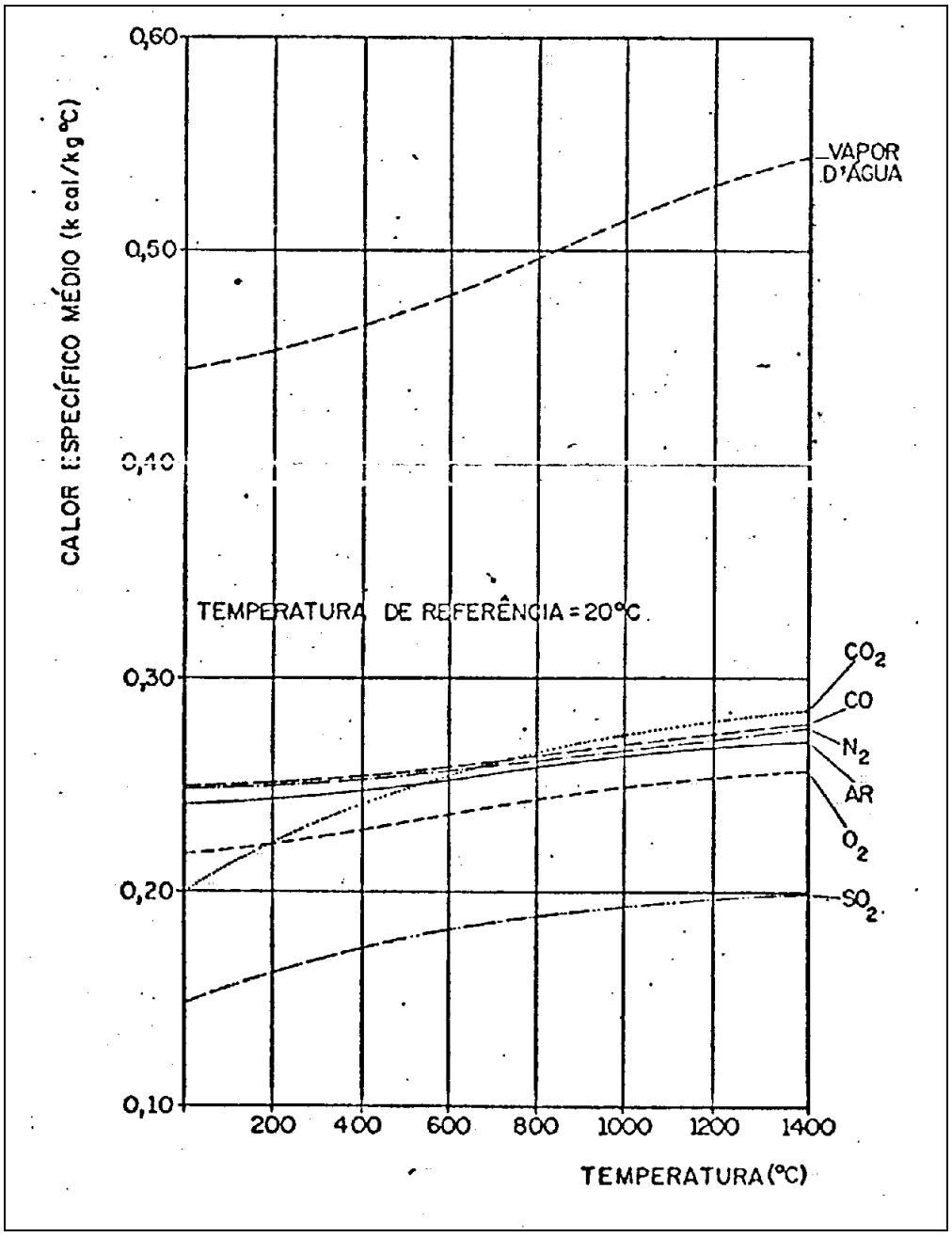
As quantidades de excesso de ar são, regra geral, maiores que aquelas utilizadas no caso de combustíveis líquidos. Podem variar de 30 a 100%, dependendo do tipo de grelha, combustível utilizado e sua granulometria. A forma construtiva da fornalha também influência o excesso de ar necessário.

No caso de combustíveis sólidos, o correspondente à nebulização pode ser interpretado como sendo a granulometria do material sólido. Nesse caso, no entanto, muito embora, à semelhança dos combustíveis líquidos, uma granulometria mais fina contribua para aumentar a velocidade de combustão, existem certos aspectos técnicos que não permitem a diminuição excessiva da granulometria. Esse procedimento poderia levar às seguintes conseqüências: perda excessiva de combustível não queimado pelos vazios da grelha, aglomeração de combustível, ar passando através de canais preferenciais impedindo a homogeneização do leito, aumento da perda de carga do ar através do leito, arraste de partículas, etc.

Conseqüentemente, a granulometria a ser adotada é aquela que oferece a máxima eficiência de combustão, satisfeitos os requisitos limitantes acima mencionados.

TABELA E.5 Propriedades de óleos combustíveis[(a)]							
Análises Típicas	Querosene	Diesel	OC-4	BPF	BTE	BTE	APF
Densidade 20/4ºC	0,785	0,825	0,865	0,970	0,940	0,910	0,925
Ponto de Fulgor	55	74	85	130	130	160	140
Viscosidade CIN 20ºC,cSt	2,2	-	-	-	-	-	-
Viscosidade SSU 100ºF	-	39	45	10.000	7.500	5.600	5.000
Viscosidade de SSF 122ºF	-	-	-	390	330	220	180
Ponto de Névoa (ºC)	-	2	-	-	-	-	-
Ponto de Fluidez	-	-	2	10	5	48	35
Índice Diesel	-	62	-	-	-	-	-
Enxofre (%peso)	0,03	0,70	1,4	4,6	0,95	0,15	2,8
Poder Calorífico Superior	kJ/kg kcal/kg	46422 11100	45815 10950	45355 10840	43304 10350	43995 10515	44560 10650	44037 10525
Poder Calorífico Inferior	kJ/kg kcal/kg	43430 10380	42928 10260	42593 10180	40878 9770	41003 9800	41631 9950	41045 9810

Fonte: (5) **(a)** os valores apresentados podem mostrar diferenças em relação a outras refinarias, ou em períodos diferentes.



E.6 Calor específico médio de gases

Calor específico médio X temperatura (6)							
CALOR ESPECÍFICO MÉDIO (kcal/ºC Nm^3)							
T (ºC)	H_2	N_2	CO	O_2	H_2O	CO_2	Ar
0	0,310	0,310	0,310	0,312	0,354	0,382	0,314
100	0,310	0,311	0,311	0,314	0,358	0,406	1
200	0,310	0,311	0,313	0,319	0,362	0,429	0,312
300	0,310	0,313	0,315	0,324	0,367	0,448	0,313
400	0,310	0,315	0,318	0,329	0,372	0,464	0,315
500	0,311	0,318	0,321	0,333	0,378	0,478	0,318
							0,321
600	0,311	0,321	0,325	0,337	0,384	0,491	0,324
700	0,312	0,324	0,328	0,341	0,390	0,502	0,327
800	0,313	0,327	0,331	0,344	0,396	0,512	0,330
900	0,314	0,330	0,334	0,348	0,402	0,521	0,333
1 000	0,315	0,333	0,337	0,350	0,409	0,530	0,336
1 100	0,317	0,336	0,340	0,353	0,415	0,537	0,339
1 200	0,318	0,338	0,342	0,355	0,421	0,545	0,341
1 300	0,320	0,340	0,344	0,357	0,427	0,548	0,343
1 400	0,321	0,343	0,346	0,359	0,432	0,553	0,346
1 500	0,323	0,345	0,348	0,361	0,438	0,558	0,348
1 600	0,325	0,347	0,350	0,363	0,443	0,563	0,350
1 700	0,326	0,349	0,352	0,364	0,448	0,568	0,352
1 800	0,328	0,351	0,354	0,366	0,453	0,572	0,354
1 900	0,329	0,352	0,356	0,367	0,458	0,576	0,355
2 000	0,331	0,354	0,357	0,368	0,462	0,579	0,357

Conhecida a composição, o calor específico médio dos gases de chaminé pode ser calculado como média ponderada dos calores específicos dos gases componentes. Pela observação da tabela e do gráfico é fácil perceber que quanto maior o excesso de ar mais o calor específico médio dos gases de chaminé se aproxima daquele do ar, na mesma temperatura. Na prática adotam - se, para os gases, os valores referentes ao ar.

Bibliografia Parte 5

1. HORTA, Luiz Augusto. Notas de Aula. EFEI. 1991.
2. STONE, Richard. Internal Combustion Engines. 2th Edition. S.A.E. 1995
3. MESNY, Marcelo. Generación del Vapor. Buenos Aires, Centro Estudiantes Ingenieria. “La linha recta”, 1972.
4. PETRÓLEO BRASILEIRO S/A. Estudo técnico-econômico para produção de gás de carvão no Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, 1977. v.1 p.31.
5. INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. Curso de informação sobre combustíveis e combustão. Rio de Janeiro. IBP, 1977.
6. FIASCHI, A.A. Palestra proferida no projeto de conservação de energia na indústria cerâmica. São Paulo, IPT, 1979, p.5.
7. 5.PERA, Hildo. Geradores de vapor de água (Caldeiras). São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996.
8. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Conservação de Energia na Indústria Cerâmica - Manual de Recomendações. São Paulo, IPT, 1980. (Publicação IPT Nº 1161).
9. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Tópicos sobre gaseificação e gaseificadores. São Paulo, IPT, Setembro/Outubro, 1981.
10. STAMBULEANU, A. Flame combustion processes in industry. Ken, Abacus Press, 1976, p. 533.
11. NATIONAL INDUSTRIAL FUEL EFFICIENCY SERVICE LTD. Boiler Operators Handbook. London, Grahan and Trotman Limited, 1981.
12. MILLAN, Pedro 1. Sistemas de gaseificação e utilização de gás pobre como combustível industrial. São Paulo, ABACE, Março, 1981